

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet strojarstva i brodogradnje

DIPLOMSKI RAD

Josip Vuković

Zagreb, 2009

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet strojarstva i brodogradnje

DIPLOMSKI RAD

Voditelj rada:
Prof.dr.sc. Damir Markučić

Josip Vuković

Zagreb, 2009



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE
 Središnje povjerenstvo za završne i diplomske radove
 Povjerenstvo studija strojarstva za smjer
 Proizvodno inženjerstvo



Zagreb, 16. rujna 2008.

Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **JOSIP VUKOVIĆ**

Mat. br.: 0035151116

Naslov: **USPOREDBA METODA MJERENJA DEBLJINA PREVLAKA**

Opis zadatka:

U radu je potrebno dati sustavnu usporedbu nerazornih metoda za mjerenje debljina prevlaka na metalnim podlogama, odnosno usporediti načela i postupke mjerenja metodom vrtložnih struja i magnetskom metodom. Uvidom u materijale objavljene na internetu i u tiskanoj literaturi potrebno je usporedno prikazati:

- o osnovna načela metoda
- o područja primjene u industrijskoj praksi
- o utjecajne čimbenike

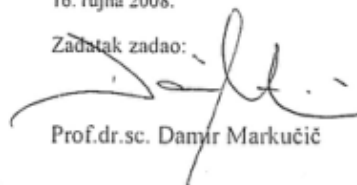
Temeljem prikupljenih spoznaja, u drugom dijelu rada potrebno je provesti usporedbena mjerenja dviju metoda na odgovarajućim postojećim, ili pripremljenim uzorcima s posebnim osvrtom na podešavanje ispitnih sustava prije mjerenja te zahtijevana uzorkovanja.

Komentirati dobivene rezultate mjerenja obzirom na ponovljivost i obnovljivost. Po mogućnosti procijeniti čimbenike koji u najvećoj mjeri doprinose varijabilnosti rezultata te sugerirati mjere unaprijeđenja pouzdanosti ispitnih postupaka.

Zadatak zadan:

16. rujna 2008.

Zadatak zadao:

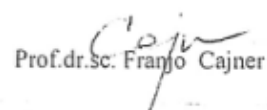

 Prof.dr.sc. Damir Markučić

Referenca za diplomsko i završno ispiti

Rok predaje rada:

ožujak 2009.

Predsjednik povjerenstva :


 Prof.dr.sc. Franjo Cajner

Vrijeme: 120 - 150 min

SAŽETAK

U ovom diplomskom radu uspoređene su dvije nerazorne metode za mjerenje debljina prevlaka na metalnim podlogama. U prvom dijelu rada detaljno su opisane magnetska metoda i metoda vrtložnih struja, njihova osnovna načela, područje primjene i utjecajni čimbenici.

U drugom dijelu rada provedena su usporedbena mjerenja navedenih dviju metoda pri ujednačenim mjernim uvjetima. Mjerenja magnetskom metodom provedena su na čeličnoj ploči, na kojoj su naneseni organski premazi u tri različite debljine slojeva (50 μm , 150 μm , 200 μm). Mjerenja metodom vrtložnih struja provedena su na aluminijskoj ploči, na koju su također naneseni organski premazi u tri različite debljine slojeva (50 μm , 100 μm , 150 μm). Mjerenja su provedena od strane tri mjeritelja s pet ponavljanja.

Analizom rezultata izračunati su statistički parametri ponovljivosti i obnovljivosti (R&R) pomoću programskog paketa „STATGRAPHICS plus 5.1“.

Sadržaj:

1.	UVOD	1
2.	ODREĐIVANJE DEBLJINE PREVLAKA	2
2.1.	Vrste prevlaka.....	2
2.2.	Metode za mjerenje debljine prevlaka	3
2.2.1.	Destruktivne metode	7
2.2.2.	Nerazorne metode.....	8
2.2.2.1.	Metoda povratne disperzije β -zraka	8
2.2.2.2.	Metoda rendgenske fluorescencije	9
2.2.2.3.	Kapacitivna metoda.....	9
2.2.2.4.	Nerazorne optičke metode	10
3.	MAGNETSKA METODA.....	11
3.1.	Utjecajni čimbenici na točnost mjerenja magnetskom metodom	13
3.2.	Kalibracija instrumenata	16
3.2.1.	Kalibracijski etaloni.....	17
4.	METODA VRTLOŽNIH STRUJA	18
4.1.	Osnovni principi metode vrtložnih struja	18
4.2.	Utjecajni čimbenici na točnost mjerenja metodom vrtložnih struja.....	21
4.3.	Kalibracija instrumenta	26
4.3.1.	Kalibracijski etaloni.....	26

4.4.	Interpretacija rezultata	27
4.5.	Oprema za ispitivanje	27
4.6.	Ispitno izvješće	28
5.	MJERENJE DEBLJINE PREVLAKE MAGNETSKOM METODOM	29
5.1.	Plan mjerenja.....	29
5.2.	Kalibracija instrumenta	32
5.3.	Rezultati mjerenja.....	33
6.	MJERENJE DEBLJINE PREVLAKE METODOM VRTLOŽNIH STRUJA.....	35
6.1.	Plan mjerenja.....	35
6.2.	Kalibracija instrumenta	36
6.3.	Rezultati mjerenja.....	37
7.	ANALIZA I USPOREDBA REZULTATA MJERENJA.....	39
7.1.	R&R analiza za magnetsku metodu.....	40
7.2.	R&R analiza za metodu vrtložnih struja	44
7.3.	Usporedba rezultata mjerenja.....	48
8.	ZAKLJUČAK.....	51
9.	LITERATURA	52

Popis slika:

SLIKA 3.1. MAGNETSKI PULL-OFF UREĐAJ U OBLIKU OLOVKE.....	11
SLIKA 3.2. ROLL-BACK MAGNETSKI UREĐAJ ZA MJERENJE DEBLJINE PREVLAKE.....	12
SLIKA 3.3. PRINCIP MJERENJA DEBLJINE PREVLAKE MAGNETSKOM METODOM.....	13
SLIKA 4.1. OSNOVNI PRINCIP METODE VRTLOŽNIH STRUJA.....	19
SLIKA 5.1. PLAN MJERENJA NA ČELIČNOJ PLOČI.....	29
SLIKA 5.2. ČELIČNA PLOČA S OZNAČENIM MJESTIMA MJERENJA.....	30
SLIKA 5.3. ISPIS PODATAKA U POSISOFT PROGRAMU.....	31
SLIKA 5.4. UREĐAJ DEFELSKO FNS3.....	32
SLIKA 5.5. ETALONSKI LISTIĆI.....	33
SLIKA 6.1. ALUMINIJSKA PLOČA S OZNAČENIM MJESTIMA MJERENJA.....	35
SLIKA 7.1. GRAFIČKI PRIKAZ REZULTATA MJERENJA NA ČELIČNOJ PLOČI – DIO A.....	41
SLIKA 7.2. GRAFIČKI PRIKAZ REZULTATA MJERENJA NA ČELIČNOJ PLOČI – DIO B.....	42
SLIKA 7.3. GRAFIČKI PRIKAZ REZULTATA MJERENJA NA ČELIČNOJ PLOČI – DIO C.....	43
SLIKA 7.4. GRAFIČKI PRIKAZ REZULTATA MJERENJA NA ALUMINIJSKOJ PLOČI – DIO A.....	45
SLIKA 7.5. GRAFIČKI PRIKAZ REZULTATA MJERENJA NA ALUMINIJSKOJ PLOČI – DIO B.....	46
SLIKA 7.6. GRAFIČKI PRIKAZ REZULTATA MJERENJA NA ALUMINIJSKOJ PLOČI – DIO C.....	47
SLIKA 7.7. PROCIJENJENE RAZLIKE ZA MJERENJA MAGNETSKOM METODOM.....	48
SLIKA 7.8. PROCIJENJENE RAZLIKE ZA MJERENJA METODOM VRTLOŽNIH STRUJA.....	49

Popis tablica:

TABLICA 2.1. PODJELA NAJČEŠĆE KORIŠTENIH PODLOGA ZA PREMAZIVANJE	4
TABLICA 2.2. IZBOR MJERAČA DEBLJINE PREVLAKE	6
TABLICA 5.1. KORIŠTENE DEBLJINE ETALONSKIH LISTIĆA ZA ČELIČNU PLOČU	30
TABLICA 5.2. REZULTATI MJERENJA MAGNETSKOM METODOM PRVOG MJERITELJA	33
TABLICA 5.3. REZULTATI MJERENJA MAGNETSKOM METODOM DRUGOG MJERITELJA	34
TABLICA 5.4. REZULTATI MJERENJA MAGNETSKOM METODOM TREĆEG MJERITELJA	34
TABLICA 6.1. KORIŠTENE DEBLJINE ETALONSKIH LISTIĆA ZA ALUMINIJSKU PLOČU	36
TABLICA 6.2. REZULTATI MJERENJA PRVOG MJERITELJA METODOM VRTLOŽNIH STRUJA.....	37
TABLICA 6.3. REZULTATI MJERENJA DRUGOG MJERITELJA METODOM VRTLOŽNIH STRUJA.....	37
TABLICA 6.4. REZULTATI MJERENJA TREĆEG MJERITELJA METODOM VRTLOŽNIH STRUJA.....	38
TABLICA 7.1. REZULTATI MJERENJA DOBIVENI MIKROSKOPOM	39
TABLICA 7.2. PROCIJENJENE STANDARDNE DEVIJACIJE ZA MAGNETSKU METODU.....	40
TABLICA 7.3. PROCIJENJENE STANDARDNE DEVIJACIJE ZA METODU VRTLOŽNIH STRUJA	44
TABLICA 7.4. PROCIJENJENE STANDARDNE DEVIJACIJE RAZLIKA REZULTATA MJERENJA.....	49

POPIS KORIŠTENIH OZNAKA

Oznaka	Veličina	Jedinica
C	- kapacitet	F
d	- debljina prevlake	mm
d	- promjer zavojnice sonde	mm
d_{\max}	- maksimalna mjerljiva debljina	mm
d_{\min}	- najmanja kritična debljina	mm
D	- debljina stjenke	mm
f	- frekvencija	Hz
G	- vodljivost	S
I	- jakost struje	A
n	- faktor ispunjenja	-
R	- otpor	Ω
$R_{\bar{x}}$	- raspon aritmetičkih sredina rezultata mjerenja	μm
s	- procijenjena standardna devijacija	μm
s_r	- procijenjena standardna devijacija ponovljivosti	μm
s_R	- procijenjena standardna devijacija obnovljivosti	μm
$s_{R\&R}$	- procijenjena kombinirana standardna devijacija	μm
s_{tm}	- procijenjena standardna devijacija koja proizlazi iz različitosti debljina prevlaka u točkama mjerenja	μm

T	- tolerancija	μm
U	- napon	V
\bar{x}	- aritmetička sredina	μm
δ_0	- standardna dubina penetracije	mm
ε_0	- dielektrična konstanta vakuma	F/m
ε_r	- relativna dielektričnost prevlake	-
μ_r	- relativna permeabilnost	-
σ	- električna provodnost vodiča	S/m

Izjava

Izjavljujem da sam diplomski rad izradio samostalno, znanjem stečenim na Fakultetu strojarstva i brodogradnje, Sveučilišta u Zagrebu uz pomoć prof.dr.sc. Damira Markučića kojemu se ovim putem zahvaljujem, te literaturom navedenom u popisu.

Ovim putem želio bih se zahvaliti gosp. Dinku Tvrtkoviću, dipl.ing.stroj., koji mi je omogućio izradu diplomskog rada u prostorijama IGH, Instituta Građevinarstva Hrvatske, kao i ostalim kolegama iz IGH na bezuvjetnoj pomoći u svakom trenutku izrade ovog rada.

Također zahvalu upućujem svim profesorima, kolegama i prijateljima na višegodišnjoj potpori tijekom studija.

U Zagrebu, ožujak 2009.

1. UVOD

Kontrola kvalitete prevlake redovito se temelji na zapažanjima prilikom vizualnog pregleda i na rezultatima mjerenja debljine prevlake. Praktično iskustvo ukazuje na povezanost izgleda i debljine prevlake s jedne strane i njegovog vijeka trajanja, kao najvažnije tehničke karakteristike, s druge strane. Kontrolno ispitivanje provodi se nakon nanošenja prevlake i za vrijeme eksploatacije konstrukcijskog dijela, a zatim se ocjenjuje kvaliteta prevlake u skladu sa standardima, internim normama ili ugovornim obvezama prema naručitelju. Uređaji za mjerenje debljine prevlaka koriste različita fizikalna načela za mjerenje debljine prevlake ovisno o tome na kakvoj je osnovnoj podlozi prevlaka nanešena.

U okviru ovog rada opisane su dvije metode mjerenja debljine prevlake, magnetska metoda i metoda vrtložnih struja. Provesti će se usporedbena mjerenja tih dviju metoda na pripremljenim uzorcima i analizirati dobiveni rezultati mjerenja s obzirom na njihovu ponovljivost i obnovljivost.

2. ODREĐIVANJE DEBLJINE PREVLAKA

2.1. Vrste prevlaka¹

Svrha zaštitnih prevlaka i premaza je da dovoljno dugo štite konstrukcijski material, na koji su nanesene, od štetnih utjecaja okoline (trošenja korozijom, abrazijom, erozijom ili kavitacijom, od pojava zamora, pukotina, loma i puzanja, od bubrenja i izluživanja, razaranja biološkim čimbenicima, oštećivanja svjetlošću ili radijacijom, itd). Zaštitna funkcija prevlaka i premaza ostvaruje se prvenstveno odvajanjem materijala podloge od okoline, pa one same moraju biti dovoljno postojane i trajne u uvjetima eksploatacije. Stoga je najvažnije tehničko svojstvo prevlaka i premaza njihov vijek trajanja, a iskustvo pokazuje da je ono usko povezano s njenom debljinom.

Mnogim prevlakama osnovna svrha nije zaštita materijala, već poboljšanje estetskog izgleda (dekorativne prevlake) ili promjena električnih, toplinskih, optičkih i drugih svojstava površine konstrukcije (funkcionalne prevlake). Neke se prevlake i premazi primjenjuju u svrhu popravka pohabanih ili škartnih dijelova povećanjem dimenzija do propisanih vrijednosti (reparaturne prevlake). Treba naglasiti da je i za te prevlake vrlo značajna njihova trajnost, pa prema tome i zaštitna uloga, budući da bi bez nje svi ostali korisni efekti nanošenja prevlaka i premaza bili kratkog vijeka.

Prevlake, za zaštitu od korozije, mogu se podijeliti na:

1. Metalne prevlake, koje se dijele na:

- plemenite prevlake (katodne)
- žrtvovane prevlake (anodne)

Plemenite prevlake su prevlake metala čiji je elektrodni potencijal u promatranim uvjetima pozitivniji od elektrodnog potencijala metala koji se zaštićuje. Ovdje ubrajamo npr. prevlake od nikla, srebra, bakra, olova i kroma na čeliku.

Prevlake metala čiji je elektrodni potencijal u promatranoj sredini negativniji od elektrodnog potencijala metala koji se zaštićuje, nazivaju se žrtvovane prevlake. To su npr. prevlake Zn, Cd, Al na čeliku.

2. Konverzijske prevlake

Konverzijske prevlake nastaju na površini metala uslijed kemijskih ili elektrokemijskih reakcija. Najčešće su to fosfatne i oksidne prevlake. U otopini koja sadrži metalne fosfate i fosforu kiselinu, metal korodira stvarajući netopljive fosfate, kao i korozijske produkte koji čvrsto prijanjaju uz metal i tako ga štite od korozije. Oksidne prevlake na metalima mogu nastati kontroliranom oksidacijom, uranjanjem u odgovarajuće otopine (npr. lužine), te elektrokemijski – anodnom oksidacijom (npr. kod aluminija). Prilikom nastajanja oksidnih prevlaka metal se prevodi iz aktivnog u pasivno stanje. Metali posjeduju povećanu kemijsku otpornost sve dok konverzijske prevlake održavaju metal u pasivnom stanju, tj. dok je manja površina metala u kontaktu s elektrolitom.

3. Nemetalne prevlake

Od nemetalnih prevlaka za zaštitu metala od korozije najviše se koriste organske prevlake na bazi polimera, tzv. premazi. Nemetalne prevlake mogu još biti metalni oksidi i keramike.

2.2. Metode za mjerenje debljine prevlaka¹

Debljina prevlake važna je varijabla za ocjenjivanje kvalitete proizvoda, procesa i kontrole troškova. Pri ocjenjivanju prevlake treba mjeriti njezinu lokalnu debljinu i to na onim mjestima mjerodavne plohe gdje se očekuje najmanja debljina, s obzirom da je kvaliteta prevlake definirana upravo tom minimalnom debljinom. Mjerenje debljine prevlake može biti provedeno na više različitih načina. Pri izboru metode za mjerenja debljine prevlaka treba voditi računa o tome da svaka metoda daje dovoljno točne

rezultate samo u određenom intervalu, koji se može ustanoviti eksperimentalno, a često ga navode i proizvođači mjernih uređaja.

Postoje brojne metode za ispitivanje debljine prevlaka, a izbor ovisi o:

- lokaciji (laboratorij ili teren),
- materijalu na koji se prevlaka nanosi – metal (magnetični ili nemagnetični), drvo, žbuka, cigla i plastika,
- uvjetima premazivanja (suhi ili vlažni),
- stanju površine (gruba ili glatka, ravna ili oblikovana, debela ili tanka, itd.)

Mjerači debljine prevlake najčešće mjere debljinu prevlake na metalnoj površini koja se premazivanjem zaštićuje od korozije. Za magnetske podloge, čelične i od lijevanog željeza, mjerači se baziraju na magnetskim svojstvima. Za nemagnetske podloge, kao što su aluminij i mjed, koriste se električni mjerači. Prvi korak pri izboru mjerača je odrediti koja će se podloga ispitivati, a zatim je klasificirati u magnetske ili nemagnetske. Tablica 2.1. prikazuje primjere najčešće korištenih metalnih podloga i njihovu klasifikaciju.

Tablica 2.1. Podjela najčešće korištenih podloga za premazivanje¹

Najčešći tipovi metalnih podloga	
Feromagnetske metalne podloge	Neferomagnetske metalne podloge
Čelik	Aluminij
Lijeвано željezo	Bakar
Blago prekaljeni čelik	Cink
Feromagnetski korozijski postojani čelik	Neferomagnetski korozijski postojani čelik

Mjerači debljine prevlake tvornički su označeni s oznakom F za feromagnetske metalne podloge i s N ili NF za neferomagnetske metalne podloge. Također postoje i kombinirani mjerači označeni s oznakom F/N ili F/NF koji automatski prepoznaju tip podloge i prilagođavaju joj metodu mjerenja.

Jedan od zahtjeva pri odabiru mjerača debljine premaza je i očekivana debljina prevlake, na osnovu koje se mora odrediti mjerno područje mjerača.

Suvremeni instrumenti su najčešće izvedeni s nekoliko mjernih područja s time da se performanse mogu optimirati unutar jednog mjernog područja. Dobro pravilo pri izboru prikladnog mjernog područja mjerača je da se napravi proba na određenom premazu, a da pri tome očekivana debljina prevlake ne prelazi 80% od mjernog područja mjerača (npr. ako je očekivana debljina prevlake 500 μm mjerno područje mjerača mora biti najmanje do 625 μm , za preciznija mjerenja).

U praksi se često kao pomoć pri izboru mjerača debljine koristi tablica 2.2 koja prikazuje mogućnosti mjerenja pomoću različitih mjerača. U svakom slučaju, mora postojati fizička razlika između svojstava podloge i prevlake, npr. feromagnetska podloga s neferomagnetskom prevlakom i vodljiva podloga s nevodljivom prevlakom.

Tablica 2.2. Izbor mjerača debljine prevlake¹

	P O D L O G A									
PREMAZ	Aluminij	Mjed	Bronca	Bakar	Čelik	Magnezij	Nehrđajući čelik	Titan	Uran	Cink
Aluminij					F					
Anodizacija	N					N				
Mjed					F					
Bronca					F					
Kadmij					F					
Keramika					F					
Krom (tvrđi)	N?			N?	F					
Krom (dekorativni)										
Bakar					F					
Eloxal	N									
Epoksid	N	N	N	N	F		N	N		N
Galvanizacija					F					
Lakiranje	N	N	N	N	F		N			N
Molibden disulfid					F		N			
Boja	N	N	N	N	F	N	N	N	N	N
Plastika	N	N	N	N	F	N	N	N	N	N
Platiniranje					F					
Gumiranje	N				F				N	
Nehrđajući čelik										
Kositar					F					
Cink					F					
N: koristi mjerače za nemagnetične metalne podloge			F: koristi mjerače za magnetične metalne podloge				?: poznati uzorci potrebni za kalibraciju			

Metode za mjerenje debljine prevlake podijeljene su u dvije osnovne skupine:

- Destruktivne (razorne) metode
- Nedestruktivne (nerazorne) metode

2.2.1. Destruktivne metode

Kod destruktivnih metoda dolazi do fizičkog uništenja uzorka, te je postupak dugotrajniji i skuplji. Zbog toga se u operativnoj kontroli i mjerenju češće koriste nedestruktivne metode, koje omogućavaju dobivanje brze informacije s vrlo jednostavnim postupkom mjerenja.

Destruktivne metode su:

Mjerenja pomoću mikrometra: Kada se mala ploha ili listić oljušti s površine premazanog objekta, njegova se debljina može direktno mjeriti uporabom mikrometra. Alternativno, ukupna debljina podloge i prevlake se može mjeriti, a zatim podloga može biti izmjerena nakon uklanjanja prevlake strugačem ili otopinom. Debljina prevlake je razlika između ova dva mjerenja.

Mjerenja igličnim mjeračima: Princip mjerenja debljine suhog filma igličnim mjeračima zasniva se na prodiranju igle mjerača kroz suhi film sve do metalne podloge. U mnogim slučajevima slojevi premaza su tako tvrdi da se opiru penetraciji igličnih mjerača, pa se igla zamjenjuje svrdlom.

Mikroskopske metode: Kod upotrebe mikroskopa za mjerenje debljine prevlaka, pripremi se presjek uzorka, a debljina prevlake mjeri se pomoću mjerne skale u okularu mikroskopa. Postoje različite metode mjerenja debljine suhog filma pomoću mikroskopa:

- Kod Brighweelove metode, na filmu se napravi mala brazda ili se otkine mala krhotina. Snop svjetla projicira se na odabranu površinu pod kutom od 45° . Lom zrake svjetlosti ispituje se mikroskopom koji ima mikrometar u vidnom području

okulara. Aparatura za ovu metodu dostupna je u obliku Schmaltz optičkog analizatora površine.

- Kod Stopped metode, na uzorku se oštrim nožem napravi rez, a zatim se mikroskopom fokusiraju naizmjenice gornji i donji rubovi reza. Debljina filma računa se pomoću vertikalnih podešavanja mikroskopa.

2.2.2. Nerazorne metode

Nerazorni postupci ili metode određivanja debljine prevlake temelje se na razlikama fizikalnih svojstava prevlake i podloge, a dijele se na:

- Magnetske metode (MT)
- Metodu vrtložnih struja (EC)
- Metodu povratne disperzije β -zraka
- Metodu rendgenske fluorescencije
- Kapacitivnu metodu
- Optičke i druge metode

2.2.2.1. Metoda povratne disperzije β -zraka

Metoda povratne disperzije β -zraka služi za mjerenje debljine prevlaka na temelju ovisnosti refleksije tih zraka (tj. mlaza elektrona) od nekog materijala o rednom (atomskom) broju njegovih atoma. Elektroni se pri refleksiji odbijaju u različitim smjerovima pa se ta pojava naziva povratnom disperzijom.

2.2.2.2. Metoda rendgenske fluorescencije

Metoda rendgenske fluorescencije služi za kontrolu gotovo svih kombinacija prevlaka/podloga, a temelji se na izlaganju uzorka X-zrakama, što izaziva sekundarno zračenje s valnom duljinom ovisnom o rednom broju prisutnih atoma. Kako X-zrake prodiru kroz film i jednim dijelom kroz podlogu, u spektru fluorescentnog zračenja biti će valnih duljina karakterističnih za oba materijala. Što je debljina filma veća, intenzitet njene fluorescencije je veći, a intenzitet fluorescencije podloge manji. Maksimalne mjerljive debljine iznose obično od 8 do 80 μm , ali je donja granica mjerljivosti čak 0.02 μm .

2.2.2.3. Kapacitivna metoda

Kapacitivna metoda može poslužiti za mjerenje debljine nevodljivih prevlaka s poznatom dielektričnošću na vodljivim (obično metalnim) podlogama. Mjeri se kapacitet kondenzatora C koji čini uzorak s prevlakom i prislonjenom metalnom pločicom površine S . Tada je debljina prevlake prema jednadžbi 2.1:

$$d = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 S}{C} \quad (2.1)$$

gdje je:

ϵ_r – relativna dielektričnost prevlake

$\epsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$ – dielektrična konstanta vakuma

C – izmjereni kapacitet

2.2.2.4. Nerazorne optičke metode

Nerazorne optičke metode koriste se za kontrolu debljine prozirnih prevlaka, pri čemu se mjeri:

- pomak optičkog sustava mikroskopa kada se slika fokusira na površinu prevlake (obično označene mekom olovkom), odnosno podloge
- razmak između brazda nastalih izlaganjem uzorka monokromatskom svjetlu poznate valne duljine, tj. interferencijom zraka odbijenih od površine prevlake sa zrakama odbijenim od podloge
- razmak između dviju interferencijskih brazda nastalih iz zrake što pod kutom od 45° pada na uzorak dajući zraku koja se odbija od prevlake i zraku koja se odbija od podloge (metoda svjetlosnog presjeka)
- promjena ponašanja polariziranog svjetla pri refleksiji od osvijetlenog uzorka na kojem se nalazi prozirna prevlaka (elipsometrija)
- intenzivnost refleksije svjetla s obojenog uzorka anodiziranog aluminija (fotoelektrički postupak mjerenja dubine nijanse).

Značajka optičkih metoda je usko ograničena primjenjivost.

3. MAGNETSKA METODA

Metoda magnetske indukcije (MT) koristi se za mjerenje debljine neferomagnetske prevlake na feromagnetskim podlogama. Metoda je izravna, tj. vrh sonde dodiruje dio koji se mjeri. Kada je sonda pozicionirana, mjeri se linearna udaljenost između vrha sonde koja dodiruje kontaktnu površinu i osnovnog metala. Instrumenti za mjerenje debljine prevlake magnetskom metodom mjere silu magnetske privlačnosti između permanentnog magneta i osnovnog metala, na koji je prevlaka nanesena ili magnetskog otpora koji se javlja pri prolasku kroz prevlaku i osnovni metal. Postoje dva principa mjerenja magnetskom metodom, pull-off princip i princip elektromagnetske indukcije.²

Magnetski pull-off princip³

Uređaji koji mjere na pull-off principu koriste permanentan magnet, kalibriranu oprugu i pripadajuću mjernu skalu. Sila privlačnosti između magneta i podloge je veća što je prevlaka tanja, odnosno ta sila privlačnosti je slabija što je prevlaka deblja. Debljina prevlake tako se utvrđuje mjerenjem potrebne sile da se uređaj odvoji od podloge.

Magnetski pull-off uređaji su u obliku olovke (pencil-type) i osmišljeni su za rad u jednoj ili dvije pozicije, relativno su jeftini, jednostavni, a primjenjuju se tamo gdje je potrebna brza kontrola tijekom proizvodnje (slika 3.1). Preciznost takvih uređaja iznosi $\pm 10\%$.



Slika 3.1. Magnetski pull-off uređaj u obliku olovke³

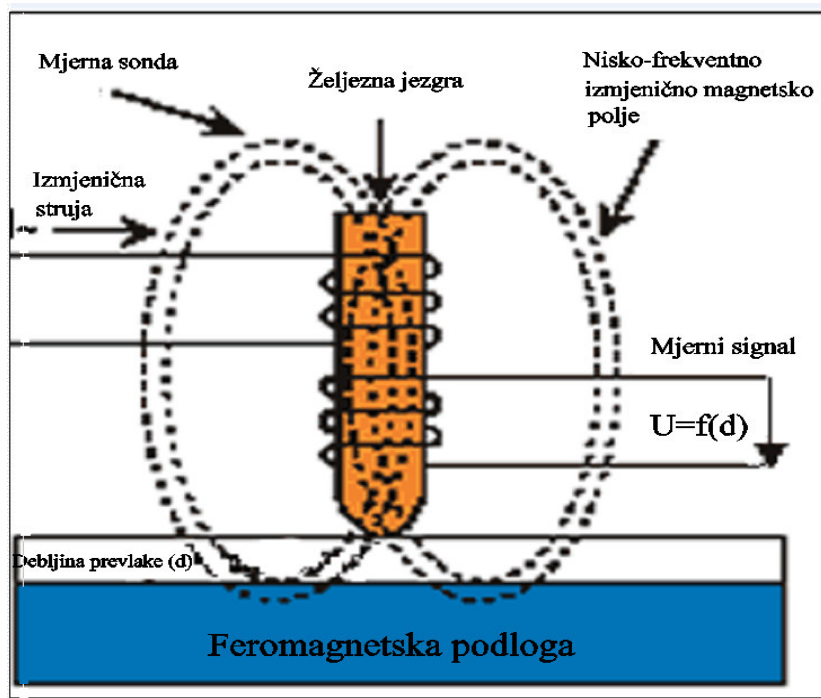
Roll-back modeli (slika 3.2) mogu mjeriti u bilo kojem položaju, precizniji su od uređaja u obliku olovke, a preciznost takvih uređaja iznosi $\pm 5\%$.



Slika 3.2. Roll-back magnetski uređaj za mjereje debljine prevlake³

Princip elektromagnetske indukcije³

Uređaji koji rade na principu elektromagnetske indukcije koriste izmjenično magnetsko polje. Sonda takvih uređaja građena je od željezne jezgre i dvije zavojnice. Primarna zavojnica priključena je na izvor struje i stvara magnetsko polje. Kada se sonda približava podlozi na koju je nanescena prevlaka, dolazi do promjene gustoće magnetskog polja u tom području. Ta promjena magnetske indukcije mjeri se pomoću sekundarne zavojnice, kako je prikazano na slici 3.3. Izlazni signal sekundarne zavojnice pretvara se pomoću mikroprocesora, tako da se dobije digitalni prikaz vrijednosti debljine prevlake.



Slika 3.3. Princip mjerenja debljine prevlake magnetskom metodom³

Suvremeniji instrumenti za mjerenje imaju mogućnost pohranjivanja i obrađivanja podataka, izračunavanja statističkih podataka kao što su prosječna vrijednost, standardna devijacija, maksimalna i minimalna vrijednost, broj mjerenja, prikaz rasipanja podataka po normalnoj razdiobi, prikaz raznih histograma, itd. Preciznost takvih uređaja je $\pm 1\%$.

Prednosti magnetske metode u odnosu na neke druge metode mjerenja su relativno velika brzina mjerenja (rezultati mjerenja odmah se vide na digitalnom zaslonu), nerazaranje materijala koji se mjere, relativno jeftina metoda, jednostavna za rad, itd.

3.1. Utjecajni čimbenici na točnost mjerenja magnetskom metodom⁴

Postoji više utjecajnih čimbenika na točnost mjerenja, a to su prije svega:

- Debljina prevlake: Preciznost mjerenja mijenja se s debljinom prevlake, zavisno o konstrukciji instrumenta. Za tanke prevlake, preciznost je konstantna. Kod debljih prevlaka preciznost je funkcija debljine prevlake.

- Magnetska svojstva osnovnog metala: Mjerenje debljine prevlake magnetskom metodom temelji se na razlikama magnetskih svojstava osnovnog metala i prevlake. Da bi se izbjegao utjecaj temperature, instrumenti moraju biti kalibrirani pomoću kalibracijskih etalona, tako da se koristi osnovni metal s istim svojstvima kao i ispitni uzorak, ili ako je moguće da se uzorak ispita prije primjene.
- Debljina osnovnog metala: Za svaki instrument postoji najmanja kritična debljina osnovnog metala, iznad koje iznos debljine osnovnog materijala neće imati utjecaja na točnost mjerenja. To ovisi o sondi samog instrumenta i prirodi osnovnog metala. Kritična debljina treba biti određena eksperimentalno, osim ako je nije odredio proizvođač.
- Rubni efekti: Magnetska metoda osjetljiva je na nenadane promjene (npr. pojavu pukotina na osnovnom materijalu, mjerenja na rubu osnovnog materijala, itd) na površinskom dijelu ispitnog uzorka. Stoga mjerenja koja se provode preblizu ruba ili unutar kuta neće biti valjana, osim ako instrument nije posebno kalibriran za takva mjerenja. Mjerenja bi se trebala provoditi najmanje 20 mm od takvih diskontinuiteta, zavisno o instrumentu.
- Zakrivljenost ispitnog uzorka: Na mjerenja utječe zakrivljenost ispitnog uzorka. Utjecaj zakrivljenosti zavisi o vrsti instrumenta, ali uvijek postaje izraženiji kada se radijus zakrivljenosti smanjuje. Za mjerenja zakrivljenih ispitnih uzoraka instrumenti trebaju biti posebno kalibrirani. Instrumenti koji imaju bipolarne sonde mogu pokazivati različite rezultate mjerenja, ako su polovi poravnani u ravnini koja je paralelna s osi cilindričnog dijela. Sličan efekt može se pojaviti i s jedno-polarnom sondom ako je vrh sonde nejednako istrošen.
- Površinska hrapavost: Ako rezultati mjerenja na nekoj hrapavoj površini nisu u granicama ponovljivosti instrumenta, potreban broj mjerenja na takvoj površini ne smije biti manji od pet.
- Smjer mehaničke obrade: Na mjerenja provedena instrumentima s bipolarnim sondama ili nejednako istrošenim jedno-polarnim sondama može utjecati smjer

mehaničke obrade osnovnog metala (npr. smjer valjanja). Ako mehanička obrada ima izrazit utjecaj na očitavanje, sonda mora imati istu orijentaciju kao kad je kalibrirana. Ako je to nemoguće, trebaju se provesti četiri mjerenja u istoj mjernoj točki tako da se sonda svaki put rotira za 90° .

- **Zaostali magnetizam:** Zaostali magnetizam kod osnovnih materijala od feromagnetskih metala utječe na mjerenja sa instrumentima koji koriste stalno magnetsko polje. Utjecaj na instrumente koji koriste izmjenično magnetsko polje je mnogo manji. Ako je u osnovnom materijalu prisutan zaostali magnetizam, a mjerimo instrumentom koji koristi stalno magnetsko polje, važno je mjerenja provesti u dva različita smjera od 180° .
- **Magnetska polja:** Jaka magnetska polja, kao što su polja dobivena različitim električnim uređajima, mogu ozbiljno utjecati na rad instrumenata koji koriste stalno magnetsko polje.
- **Stanje površine:** Sonda svakog instrumenta mora imati fizički kontakt s ispitnom površinom. Instrumenti su osjetljivi na strana tijela koja onemogućuju direktan kontakt sonde i površine prevlake. Prije svakog mjerenja s površine se treba odstraniti svaki nepoznati materijal, kao što je prljavština, mast, korozijski produkti, bez da se ošteti materijal same prevlake. Pri provođenju mjerenja treba izbjegavati područja koja imaju vidljiva oštećenja koja je teško odstraniti, kao što su zavarena i lemljena mjesta, kiseline, oksidi, itd.
- **Provodljivost prevlake:** Određeni magnetski instrumenti rade na frekvencijama od 200 Hz do 2000 Hz. Na ovim frekvencijama, vrtložne struje koje se stvaraju u gustim, visoko provodljivim prevlakama mogu ometati rad instrumenta.
- **Sila pritiska sonde:** Mjerne sonde dodiruju prevlaku konstantnom ali dovoljno visokom silom pritiska, tako da ne može doći do deformacije prevlake, pa čak ni ako je materijal prevlake premekan. Meke prevlake mogu biti prekrivene folijom (npr. listićem od kovine), a debljina folije se oduzima od konačnog rezultata.

- Orijentacija sonde: Na uređaje koji rade na principu magnetske privlačnosti utječe orijentacija magneta u odnosu na Zemljino polje gravitacije. Zato rad sonde uređaja u vodoravnom ili “obrnutom” (upside-down) položaju može zahtijevati različitu kalibraciju, ili može biti nemoguć.

3.2. Kalibracija instrumenata⁴

Prije uporabe, svaki instrument treba biti kalibriran prema uputama proizvođača, koristeći prikladne kalibracijske etalone. Kod instrumenata koji ne mogu biti kalibrirani, odstupanje od nominalne vrijednosti određuje se usporedbom sa kalibracijskim etalonima. U tom slučaju to odstupanje treba uzeti u obzir kod svih mjerenja. Tijekom ispitivanja, kalibracija instrumenta se treba kontrolirati u određenim intervalima, pri čemu posebnu pažnju treba posvetiti na čimbenike iz točke 3.1.

Hrapavost površine i magnetska svojstva osnovnog metala i kalibracijskog etalona trebali bi biti slični ispitnom uzorku. Kako bi se potvrdila njihova kompatibilnost, preporuča se usporediti mjerenja nepresvučenog osnovnog metala standardiziranog kalibriranja s uzorkom bez prevlake.

U nekim slučajevima, kalibracija instrumenta treba se provjeravati tako da se sonda instrumenta rotira za 90°, kako bi se izbjegla ili kompezirala pojava neželjenih čimbenika opisanih u točki 3.1.

Ako debljina osnovnog materijala nije veća od kritične debljine, osnovni materijal treba “podebljati” dovoljnom debljinom sličnog materijala.

Ako je prevlaka koja se mjeri zakrivljena, tada zakrivljenost etalonske prevlake ili podloge na koju se postavlja kalibracijska folija treba biti ista kao kod ispitnog uzorka.

3.2.1. Kalibracijski etaloni⁴

Kalibracijski etaloni ujednačene debljine dolaze ili u obliku podloška ili folije, ili kao etalonske prevlake.

Kalibracijske folije: U ovoj točki, riječ “folija” odnosi se na neferomagnetsku metalnu ili nemetalnu foliju ili pločicu. Zbog poteškoća da se ostvari adekvatan spoj folije i osnovnog metala, općenito folije nisu preporučljive za kalibraciju instrumenata kada se koriste načela magnetske sile privlačnosti. Kalibracijske folije su prikladne u određenim uvjetima, ali uz određene mjere opreza. One mogu biti korištene za kalibraciju drugih vrsta instrumenata.

Folije se, za razliku od etalonskih prevlaka često koriste za kalibraciju instrumenta kod mjerenja zakrivljenih površina.

Kako bi se izbjegle greške prilikom mjerenja, potrebno je utvrditi da je uspostavljen kontakt između folije i osnovnog metala.

Kalibracijske folije su podložne udubljenjima pa se stoga trebaju često mijenjati.

Etalonske prevlake: Etalonske prevlake sastoje se od poznatih prevlaka, jedinstvene debljine, koje su vezane za osnovni materijal.

4. METODA VRTLOŽNIH STRUJA

Mjerenje debljine prevlaka metodom vrtložnih struja (EC) temelji se na razlici u električnoj vodljivosti između prevlake i podloge. Metoda je posebno primjenjiva za mjerenja debljine većine oksidiranih prevlaka nastalih anodnim procesom, ali se ne može primijeniti na sve konverzijske prevlake, od kojih su neke pretanke da bi se izmjerile ovom metodom. Iako se teoretski metoda može koristiti za mjerenje debljine prevlaka na magnetskim osnovnim materijalima, njezina primjena za takve osnovne materijale nije preporučljiva. U takvim slučajevima preporučuje se magnetska metoda.⁵

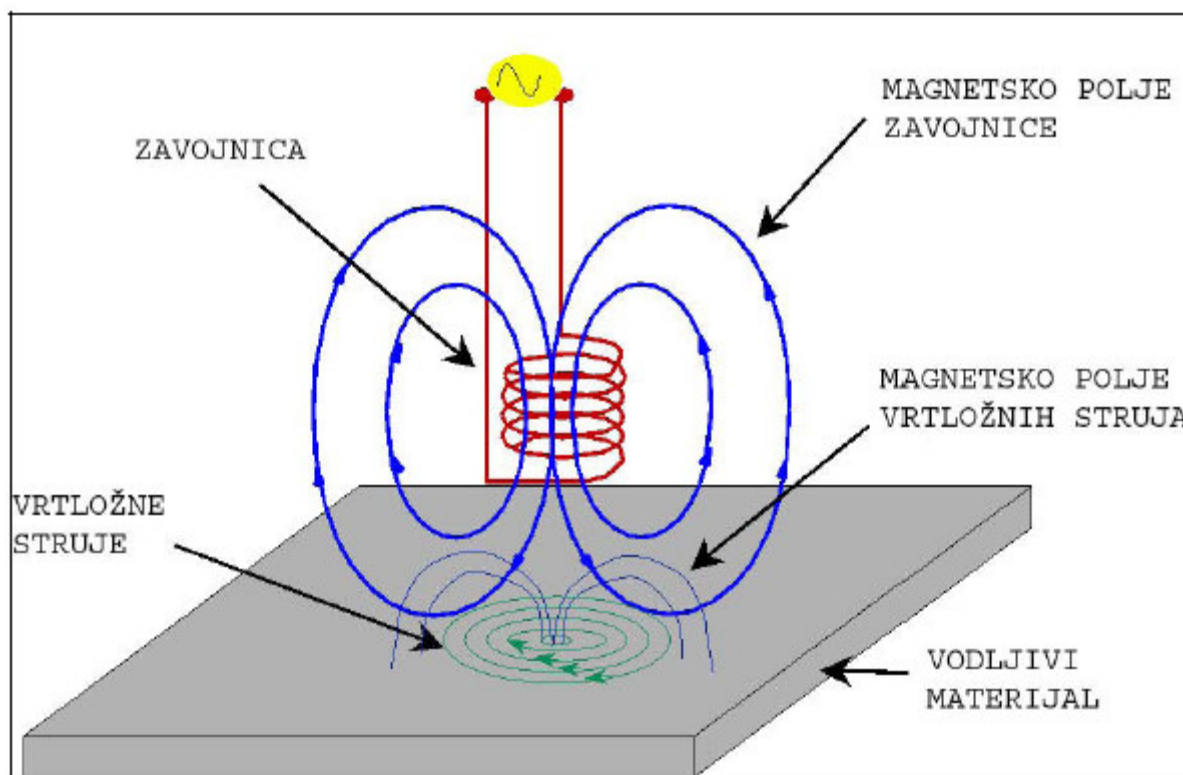
U općem slučaju ova metoda ima multifunkcionalnu primjenu:

- Utvrđivanje vodljivosti materijala (u svrhu klasifikacije materijala, detekcije toplinskih oštećenja...)
- Utvrđivanje permeabilnosti materijala
- Utvrđivanje kemijskog sastava legura
- Mjerenje debljina nevodljivih prevlaka na nemagnetičnim, vodljivim materijalima
- Mjerenje debljine nemagnetičnih, vodljivih prevlaka na nevodljivim prevlakama
- Mjerenje debljine nemagnetičnih metalnih prevlaka na nemagnetičnim metalima
- Ispitivanje tankostijenih cijevi (detekcija oštećenja i različitih uključaka)

4.1. Osnovni principi metode vrtložnih struja³

Pod utjecajem promjenljivog magnetskog polja u električki vodljivom materijalu induciraju se vrtložne struje (slika 4.1). Prolaskom visokofrekventne izmjenične struje kroz vodič (npr. bakrena zavojnica) formira se magnetsko polje oko same zavojnice

prema pravilu desne ruke. Ukoliko se u blizini tog vodiča nađe vodljivi materijal, magnetska indukcija će “propagirati” u isti.



Slika 4.1. Osnovni princip metode vrtložnih struja⁵

Vrtložne struje nastale u vodljivoj podlozi kreiraju svoju vlastitu impedanciju u zavojnici stvarajući visoko frekventno polje. Veličina promjene impedancije (odnosno napona zavojnice) funkcija je udaljenosti mjerne sonde od površine metala, odnosno debljine prevlake. Nevodljive prevlake predstavljaju “odmaknutost” između osnovnog metala i ispitne sonde. Ta “odmaknutost” izaziva gubitak u penetraciji vrtložnih struja u osnovni materijal i uzrokuje promjenu impedancije zavojnice sonde.

Dubina prodiranja vrtložnih struja u materijal funkcija je nekoliko parametara, prije svega svojstva materijala (vodljivost i permeabilnost materijala), faktora ispunjenja, frekvencije ispitivanja te kontakta između ispitne zavojnice i uzorka.

Jednadžba 4.1. prikazuje o čemu ovisi dubina penetracije:

$$\delta_0 = \frac{503}{\sqrt{f \cdot \sigma \cdot \mu_r}} \quad (4.1.)$$

gdje je:

δ_0 – standardna dubina penetracije u mm

f – frekvencija sonde u Hz

μ_r – relativna permeabilnost (za nemagnetske materijale $\mu_r = 1$)

σ – električna provodnost vodiča, u MS/m (megasimens po metru)

Iz jednadžbe 4.1. vidljiva je obrnuto proporcionalna veza frekvencije i dubine penetracije.

Faktor koji je mjerodavan za kvalitetan prijenos inducirane struje u materijal u obliku vrtložnih struja zove se faktor ispunjenja koji bi se za kvalitetna mjerenja trebao kretati u granicama od 0.8 do 0.99. Faktor ispunjenja izračunava se prema izrazu 4.2.

$$n = \frac{d^2}{D^2} \quad (4.2.)$$

gdje je:

d – promjer zavojnice sonde (mm)

D – debljina stijenke (mm)

U slučaju da je faktor ispunjenja manji od 0.8 znači da odabrani promjer zavojnice nije dovoljno velik te da nema dobrog magnetskog kontakta. Time nema niti vrtložnih struja za daljnje ispitivanje.

Frekvencije ispitivanja u pravilu se dijele u tri kategorije:

- Niske frekvencije: 1 – 50 kHz
- Srednje frekvencije: 50 – 500 kHz
- Visoke frekvencije: preko 500 kHz

Uređaji za mjerenje debljine prevlake metodom vrtložnih struja slični su onima koji rade na principu elektromagnetske indukcije. Tipična preciznost takvih uređaja je $\pm 1\%$. Dostupni instrumenti koriste analogni, digitalni ili mikroprocesorski dizajn. Mnogi mikroprocesorski instrumenti nude dvostruku mogućnost za elektromagnetsku indukciju na feromagnetskim (F) i ne feromagnetskim (N) materijalima s instrumentom koji koristi princip vrtložnih struja i koji ima dva različita dizajna sonde.

4.2. Utjecajni čimbenici na točnost mjerenja metodom vrtložnih struja⁶

Postoji više utjecajnih čimbenika na točnost mjerenja, a to su prije svega:

- Debljina prevlake: Preciznost mjerenja mijenja se s debljinom prevlake. Kod tankih prevlaka nepreciznost mjerenja je konstantna, neovisna o debljini prevlake i iznosi najmanje $0,5 \mu\text{m}$ za jedan niz mjerenja. Kod prevlaka debljih od $25 \mu\text{m}$, nepreciznost postaje funkcija debljine prevlake. Za mjerenja debljina prevlaka manjih od $5 \mu\text{m}$, uvijek se uzima prosjek nekoliko mjerenja.
- Električna svojstva osnovnih materijala: Na mjerenja može utjecati električna vodljivost osnovnih materijala, koja je funkcija strukture i toplinske obrade materijala. Utjecaj električne vodljivosti na mjerenja varira značajno ovisno o izradi i tipu instrumenta. Materijali kojima se elektroni mogu lagano izbaciti iz putanje pod djelovanjem električne sile nazivaju se vodičima. Jedinica vodljivosti je Simens ($S = 1/\Omega$), te se izračunava prema jednadžbi 4.3.

$$G=1/R \qquad (4.3.)$$

gdje je:

G – vodljivost u S

R – otpor u Ω

Zbog reciprociteta otpora i vodljivosti proizlazi da dobar vodič ima mali otpor i obrnuto. Kako različita vodljivost utječe na ispitnu zavojnicu, njena impedancija obrnuto djeluje na vodljivost. Veća vodljivost uzrokuje manju vrijednost impedancije.

- Debljina osnovnog metala: Za svaki instrument postoji najmanja debljina osnovnog materijala (kritična debljina), d_{\min} , iznad koje iznos debljine ne utječe na točnost mjerenja. Budući da kritična debljina utječe na frekvenciju vrtložnih struja i električna svojstva osnovnog materijala, njezinu vrijednost treba odrediti eksperimentalno, osim ako ju nije odredio proizvođač.

- Nevodljive prevlake na vodljivom osnovnom materijalu

U ovom slučaju gustoća vrtložnih struja određena je samo udaljenošću između sonde i osnovnog metala, tj. debljinom prevlake. Kako bi se to postiglo osnovni materijal mora biti deblji od najmanje kritične debljine osnovnog materijala d_{\min} . Najmanja kritična debljina d_{\min} može se odrediti pomoću jednadžbe 4.4.

$$d_{\min} = 2,5 \delta_0 \quad (4.4.)$$

Ako je debljina osnovnog materijala manja od d_{\min} , to će utjecati na mjerenu vrijednost debljine prevlake.

- Vodljive prevlake na nevodljivim osnovnim materijalima

U ovom slučaju gustoća vrtložnih struja određena je samo debljinom prevlake. Približna maksimalna mjerljiva debljina, d_{\max} u mm, može se izračunati pomoću jednadžbe 4.5.

$$d_{\max} = 0,8 \delta_0 \quad (4.5.)$$

Raspon debljine je ograničen dubinom penetracije δ_0 i ako se debljina vodljive prevlake poveća, to neće imati daljnjeg utjecaja na stvaranje vrtložnih struja. d_{\max} se zato ponekad i naziva “zasićenom debljinom”.

- Skin efekt: Skin efekt može biti poželjna i nepoželjna pojava, ovisno o tome da li se ispituje samo površina ispitnog objekta ili unutrašnjost. Ako se kroz zavojnicu pusti struja visoke frekvencije, tada će se sve vrtložne struje koncentrirati po površini ispitnog objekta, a ako se pusti struja niske frekvencije vrtložne će struje dublje penetrirati u materijal.⁵
- Rubni efekt: Instrumenti vrtložnih struja mogu biti osjetljivi na nagle promjene (npr. pojavu pukotina na osnovnom materijalu, mjerenja na rubu osnovnog materijala, itd) na površini ispitnog uzorka. Tako mjerenja obavljena preblizu ruba, ne moraju biti valjana, osim ako instrument nije posebno kalibriran za takva mjerenja.

Izmjenična struja koja prolazi ispitnom zavojnicom inducira magnetsko polje koje u materijalu pobuđuje vrtložne struje. Kako se zavojnica približava rubu ispitnog objekta, tako se vrtložne struje koje prethode zavojnici, prema određenim parametrima kao što su ispitna frekvencija i geometrijske karakteristike objekta, iskrivljuju. Ovaj negativan utjecaj može se umanjiti zaštitom zavojnice ili smanjenjem promjera ispitne zavojnice. Rubni efekt najčešće se pojavljuje kod ispitivanja ravnih ploča površinskom zavojnicom.

- Zakrivljenost površine: Na mjerenja utječe zakrivljenost površine ispitnog uzorka. Ovaj utjecaj značajno varira ovisno o izradi i tipu instrumenta i sonde, ali je uvijek izraženiji što se radijus zakrivljenosti smanjuje. Tako mjerenja izvedena na zakrivljenim ispitnim uzorcima ne moraju biti valjana, osim ako je instrument kalibriran za zakrivljenost površine o kojoj se radi, ili ako se koristi specijalna sonda koja kompenzira utjecaj površine.
- Hrapavost površine: Na mjerenja utječe topografija površine osnovnog materijala i prevlake. Hrapave površine mogu uzrokovati sustavne i slučajne pogreške. Slučajne pogreške mogu se umanjiti provedbom većeg broja mjerenja, tako da

se svako mjerenje izvrši na drugom mjestu i tada izračunava prosječna vrijednost te serije mjerenja.

- Efekt završetka: Efekt završetka slijedi sličan princip kao i rubni efekt. To je signal koji se može opaziti kod ispitivanja tanko stijениh cijevi ili nekih profila, standardnom provlačnom ili obuhvatnom zavojnicom i to u trenutku kada zavojnica prolazi preko ruba, odnosno završetka ispitnog profila ili cijevi. Ovaj efekt može se umanjiti zaštitom zavojnice ili skraćivanjem njene dužine.⁵
- “Lift-off” efekt: Ako sonda nije postavljena direktno na prevlaku, praznina između sonde i prevlake (lift-off) utječe na mjerenja debljine prevlake. Mjerna debljina će biti jednaka debljini prevlake plus dodatna “lift-off” praznina. Do “lift-off” efekta može doći nenamjerno, tj. zbog prisustva stranih čestica između sonde i prevlake, zbog čega je potrebno često provjeravati čistoću vrha sonde.
- Faktor podizanja: Elektromagnetska sprega između ispitne zavojnice i ispitnog objekta od primarnog je značaja kod ispitivanja vrtložnim strujama. Međutim, ta sprega može varirati zbog zračnosti prisutne između zavojnice i objekta koji se ispituje. Elektromagnetsko polje, najjače je u blizini ispitne zavojnice i smanjuje se s udaljenošću. Faktor podizanja je iz tog razloga puno veći ako se npr. zavojnica koja dodiruje ispitni objekt odmakne od njega za 0.1 mm, nego ako se ta zavojnica odmakne s 10 mm na 10.1 mm.

Kako nevodljivi materijali kao što su boje ili plastične mase djeluju kao zračni prostor između zavojnice i vodljivog materijala, tada je debljinu tog zračnog prostora, odnosno nevodljive prevlake, vrlo lako odrediti. Iz tog razloga oprema za ispitivanje metodom vrtložnih struja ima mogućnost brzog i jednostavnog određivanja faktora podizanja kao i mogućnost razlikovanja ovog faktora od promjene vodljivosti, permeabilnosti i ostalih karakteristika materijala ispitnog objekta. Međutim ovaj faktor može biti i nepoželjna pojava koja uzrokuje povećanje šuma, smanjenje elektromagnetskog sprega te smanjenu mogućnost detektiranja diskontinuiteta.⁵

- Sila pritiska sonde: Sila pritiska sonde na ispitni uzorak utječe na očitavanje instrumenta i zato treba biti konstantna. Ona je primjetnija kod mekših prevlaka. Većina instrumenata dostupnih u prodaji opremljeni su sondama s konstantnom silom pritiska.
- Otklon sonde: Osim ako drugačije nije odredio proizvođač, sonda se postavlja okomito na površinu prevlake jer otklon sonde od okomitog položaja može uzrokovati pogrešku u mjerenju. Vjerojatnost otklanjanja zbog nepažnje može se smanjiti dizajniranjem sonde ili upotrebom stalka koji pridržava sondu.
- Utjecaji temperature: Budući da temperaturne promjene utječu na svojstva sonde, ona se mora koristiti u približno istim temperaturnim uvjetima koji se koriste za kalibraciju, osim ako sonda ima ugrađenu kompenzaciju temperature. Kod većine metala mijenja se njihova električna vodljivost ovisno o temperaturi. Budući da na mjerenja debljine prevlake utječe promjena u električnoj vodljivosti osnovnog materijala, treba izbjegavati velike promjene temperature.
- Posredne prevlake: Prisustvo posredne prevlake može utjecati na debljinu prevlake ako se električna svojstva te posredne prevlake razlikuju od električnih svojstava druge prevlake ili osnovnog materijala. Ako razlika postoji, tada će na mjerenja dodatno utjecati debljina posredne prevlake manja od d_{\min} . Ako je debljina veća od d_{\min} , tada se posredna prevlaka (ako je neferomagnetska) može tretirati kao osnovni materijal. Neki instrumenti koji imaju sonde koje rade na višestrukim frekvencijama mogu mjeriti debljine i vršne i posredne prevlake.
- Diskontinuiteti: Oštećenja nastala korozijom ili vibracijama (udubine, ovalnost, i slično) uglavnom uzrokuju smanjenu vodljivost materijala ispitnog objekta. Diskontinuitete na površini mnogo je lakše otkriti nego razna dubinska oštećenja. Dok se površinske greške detektiraju osnovnom frekvencijom, otkrivanje dubljih oštećenja zahtijeva mnogo pažljiviji i složeniji izbor frekvencije. To su dijelovi gdje je raspodjela vrtložnih struja vrlo rijetka i gdje se, radi bolje penetracije, upotrebljava niska ispitna frekvencija.⁵

- Omjer signal – šum: Omjer amplitude očekivanog signala (npr. signala oštećenja u cijevi) i neželjenih signal (razni oblici šumova) naziva se omjer signala i šuma. Kod ispitivanja vrtložnim strujama bitno je da se nivo šuma tijekom ispitivanja svede na najmanju mjeru, odnosno da omjer signala oštećenja ispitnog objekta i šuma kod ispitivanja bude kao minimum u omjeru 3:1.⁵

4.3. Kalibracija instrumenta⁶

Prije upotrebe, svaki instrument treba kalibrirati prema uputama proizvođača, koristeći prikladne kalibracijske etalone. Pri tome, posebnu pažnju treba posvetiti čimbenicima iz točke 4.2. Kako bi se smanjile promjene provodljivosti uslijed varijacija u temperaturi, instrument i kalibracijski etaloni moraju pri kalibraciji biti pri približno jednakoj temperaturi kao i predmeti koji se mjere.

Električna svojstva osnovnog materijala kalibracijskih etalona trebaju biti približno jednaka kao i svojstva osnovnog materijala ispitnog uzorka.

Kako bi potvrdili njihovu podobnost, očitavanja dobivena mjerenjem osnovnog materijala nepresvučenog kalibracijskog etalona treba usporediti s očitanjima dobivenim mjerenjem ispitnog uzorka.

Ako debljina osnovnog materijala nije veća od kritične debljine, osnovni materijal treba “podebljati” dovoljnom debljinom materijala koji ima slična električna svojstva, kako bi se očitavanja učinila neovisnim o debljini osnovnog materijala.

Ako je zakrivljenost presvučene površine koja se mjeri takva da kalibracija na ravnoj površini neće biti valjana za takva mjerenja, etaloni korišteni pri kalibraciji trebaju imati iste radijuse zakrivljenosti kao i uzorak koji se mjeri, osim ako se koristi posebna sonda koja kompezira utjecaj zakrivljenosti.

4.3.1. Kalibracijski etaloni⁶

Kalibracija instrumenta mora se provesti pomoću najmanje dva etalona različite i poznate debljine. Jedan od ovih etalona može biti od nepresvučenog osnovnog materijala.

Kako su kalibracijski etaloni podložni trošenju tijekom vremena, potrebno ih je rekalibrirati i/ili zamijeniti u vremenskim intervalima utvrđenim lokalno, ili nakon konzultacije s proizvođačem.

4.4. Interpretacija rezultata⁶

Interpretacija i prezentacija rezultata dogovara se između zainteresiranih stranaka i obično uključuje:

- popis svih dobivenih očitavanja,
- srednje, najveće i najmanje vrijednosti,
- standardnu devijaciju i/ili varijancu rezultata.

4.5. Oprema za ispitivanje⁵

Neophodna oprema za ispitivanje metodom vrtložnih struja sastoji se od izvora izmjenične struje (oscilator), ispitne sonde sa zavojnicom koja je indirektno, preko transformatora spojena na izvor signala, voltmetra u funkciji pokazatelja pada napona na istoimenoj ispitnoj zavojnici, faznog rotatora te osciloskopa kao krajnji korisnički čitač promjene faznog kuta. Kao generator elementarnog signala, najčešće se primjenjuje sinusoidalna struja frekvencije od 1 kHz do 2 MHz. Optimiranje parametra ispitne sonde svodi se na pravilan odabir promjera žice, broja zavoja te samog promjera namota zavojnice. Sama zavojnica izvedena je u obliku namotane izolirane bakrene žice.

Voltmetar mjeri promjenu napona kroz ispitnu zavojnicu koja je pak produkt promjene stanja i svojstva ispitnog elementa, te promjene relativnog razmaka između zavojnice i materijala. Promjena napona uključuje kako razliku amplituda tako i promjenu faze relativno prema prolasku struje kroz zavojnicu.

4.6. Ispitno izvješće⁶

Ispitno izvješće uključuje sljedeće informacije:

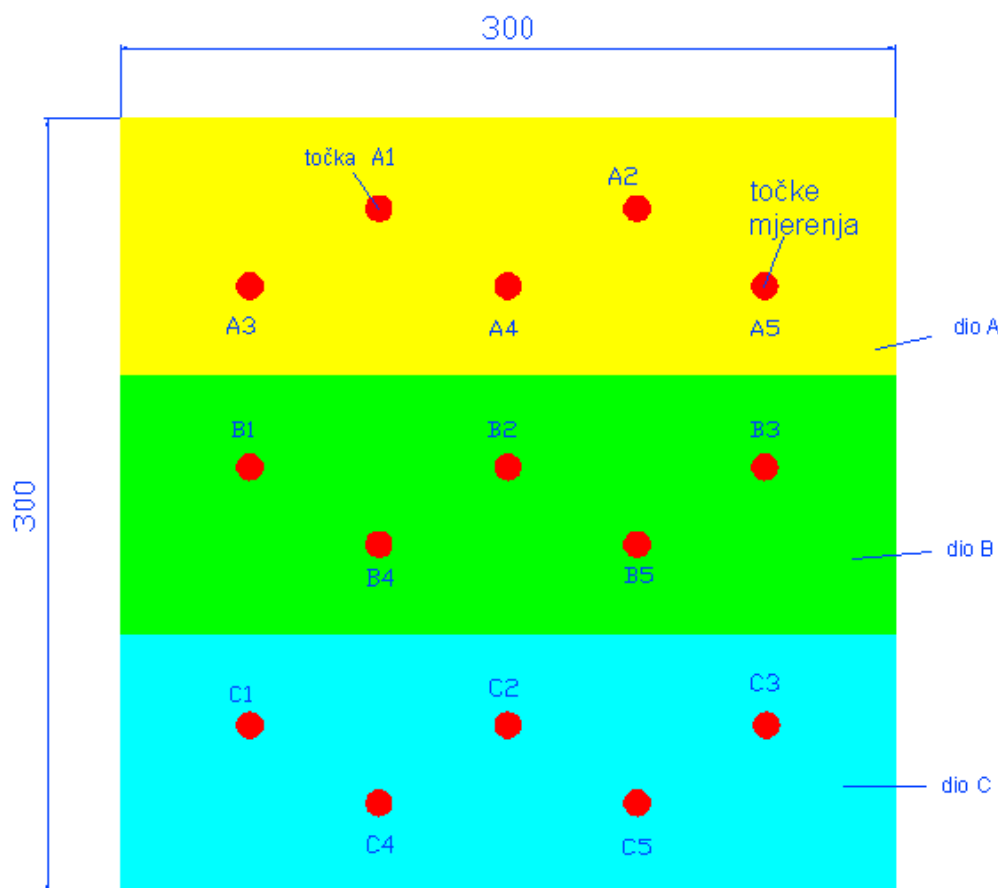
- sve informacije potrebne za identifikaciju ispitnog uzorka;
- veličine ispitnih područja, u kvadratnim milimetrima (mogu se koristiti i druge mjerne jedinice po dogovoru dobavljača i klijenta);
- lokacije ispitnih područja na svakom uzorku;
- broj mjerenih ispitnih uzoraka;
- mjerne debljine, u mikrometrima, na svakom ispitnom području i broj prosječnih mjerenja i standardna devijacija za svako područje mjerenja;
- ime mjeritelja i ispitnog laboratorija;
- datum mjerenja;
- sva neuobičajena obilježja te okolnosti i uvjeti koje bi mogle utjecati na valjanost rezultata mjerenja;
- svako odstupanje od zadane metode;
- identifikaciju instrumenta, sonde i etalona korištenih pri mjerenju, uključujući referencu sa certifikatom valjanosti opreme.

5. MJERENJE DEBLJINE PREVLAKE MAGNETSKOM METODOM

5.1. Plan mjerenja

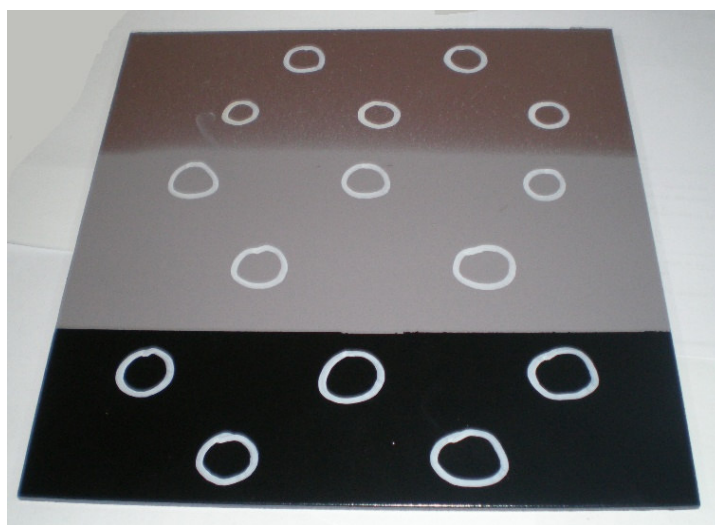
Mjerenja debljina prevlaka magnetskom metodom (MT) provedena su na čeličnoj ploči dimenzija 300 x 300 x 5 (mm). Ploča je podijeljena na tri dijela, kao što je prikazano na slici 5.1, na kojima su nanoseni premazi različitih debljina:

- dio A – temeljni premaz očekivane debljine 50 μm
- dio B – temeljni sloj s međuslojem očekivane ukupne debljine od 150 μm
- dio C – temeljni sloj s međuslojem i pokrivnim slojem očekivane ukupne debljine od 200 μm



Slika 5.1. Plan mjerenja na čeličnoj ploči

Na svakom dijelu čelične ploče odabrano je pet proizvoljnih točaka mjerenja. Točke mjerenja označene su ručno, voodootpornim markerom bijele boje (slika 5.2), i obilježavaju nešto veću površinu od kontaktne površine mjerne sonde. Stoga je teoretski moguće da eventualna neravnomjernost debljine prevlake doprinese rasipanju rezultata mjerenja u slučaju ako mjeritelj kod ponavljanja mjerenja neznatno promijeni poziciju sonde unutar označene mjerne točke.



Slika 5.2. Čelična ploča s označenim mjestima mjerenja

Instrument je kalibriran putem tzv. “nulte kalibracije” i pomoću etalonskih listića. Tablica 5.1 prikazuje korištene debljine etalonskih listića pri kalibraciji instrumenta za mjerenje ciljanih vrijednosti debljina prevlaka.

Tablica 5.1. Korištene debljine etalonskih listića za čeličnu ploču

Debljina etalonskog listića	Ciljana vrijednost debljine prevlake
54 μm	50 μm
128 μm	150 μm
252 μm	200 μm

Nakon kalibracije instrumenta na prvu očekivanu vrijednost od 50 μm , izvršeno je pet uzastopnih mjerenja u točki A1, zatim pet uzastopnih mjerenja u točki A2, i tako redom do točke A5. Zatim je instrument kalibriran za mjerenje sljedeće debljine sloja očekivane vrijednosti 150 μm , i provedeno je pet uzastopnih mjerenja u točki B1, zatim pet uzastopnih mjerenja u točki B2, i tako redom do točke B5. Nakon toga instrument je kalibriran za mjerenje sljedeće debljine sloja očekivane vrijednosti 200 μm , i ponovljen je isti postupak mjerenja kao kod dijela A i dijela B čelične ploče. Rezultati mjerenja dobiveni od strane jednog mjeritelja pohranjuju se u uređaj tijekom mjerenja. Ispis rezultata mjerenja provodi se spajanjem uređaja na računalo i korištenjem programa Posisoft (slika 5.3). Mjerenja su provela ukupno tri mjeritelja.

```
Readings - Batch1_1/29/2009 11:47:11 AM
Reading      DateTime      premaz ( $\mu\text{m}$ )
1      12:14:13  29.01.2009      62
2      12:14:17  29.01.2009      62
3      12:14:20  29.01.2009      66
4      12:14:24  29.01.2009      62
5      12:14:28  29.01.2009      64

Summary - Batch1_1/29/2009 11:47:11 AM
Reading      DateTime      premaz ( $\mu\text{m}$ )
Max                                66,00
Min                                62,00
Mean                                63,20
StdDev.                                1,79

Annotations - Batch1_1/29/2009 11:47:11 AM
Gage Model: 6000FNS3
Gage S/N: 68008
Probe Model: FNS
Probe S/N: 45856
User: Josip Vukovic
Part: celicna ploca
Substrate: celik
Coating 1: premaz
```

Slika 5.3. Ispis podataka u Posisoft programu

5.2. Kalibracija instrumenta

Za mjerenje debljine prevlake na čeličnoj ploči korišten je uređaj “DeFelsko FSN3” serije 6000 (slika 5.4). Uređaj funkcionira na principu magnetske indukcije i metode vrtložnih struja te je njime moguće mjeriti debljine slojeva na feromagnetskim i neferomagnetskim podlogama. Već samim pritiskom mjerne sonde na osnovni material na kojem mjerimo, uređaj će prema vrsti podloge sam prepoznati metodu. Na feromagnetskim podlogama željeza ili čelika na ekranu instrumenta je oznaka F, dok je na neferomagnetskim podlogama aluminijska, bakra, bronce, cinka ili nemagnetičnog čelika na ekranu instrumenta oznaka N. Mjerno područje uređaja kod obje mjerne tehnike je od 0 do 1500 μm .

Na ovom uređaju kod samog uključivanja postoji automatska kalibracija prema tvornički učitanoj N.I.S.T. etalonu. Kalibracija podešavanjem je postupak promjene, odnosno podešavanja očitavanja vrijednosti tako da na poznatom uzorku povećamo mjernu efikasnost obzirom na specifičnost oblika površine uzorka u njegovom mjernom području.



Slika 5.4. Uređaj DeFelsko FSN3

Uvijek prije početka mjerenja uređaj se kalibrira putem tzv. “nulte kalibracije”. Pod pojmom “nulta kalibracija” podrazumijeva se mjerenje vrijednosti na nepremazanim dijelovima površina i postavljanje očitane vrijednosti instrumenta na nulu. Na taj način se kompenzira utjecaj stanja površine.

Nakon “nulte kalibracije” uređaj se kalibrira pomoću etalonskih listića, prikazanih na slici 5.5. Etalonski listići su različitih debljina, a napravljeni su od plastičnih folija. Za kalibraciju se koristi listić čija debljina približno odgovara očekivanoj ili nazivnoj debljini premaza.



Slika 5.5. Etalonski listići

5.3. Rezultati mjerenja

Mjerenja su provela tri mjeritelja, redom M1, M2 i M3, a rezultati mjerenja prikazani su u tablicama 5.1, 5.2 i 5.3.

Tablica 5.2. Rezultati mjerenja magnetskom metodom prvog mjeritelja

M1	1.	2.	3.	4.	5.	max.	min.	\bar{x}	s
A1	68	62	66	70	64	70	62	66	3,16
A2	62	64	70	60	64	70	60	64	3,74
A3	74	76	72	78	74	78	72	74,8	2,28
A4	72	62	70	68	68	72	62	68	3,74
A5	66	58	64	60	58	66	58	61,2	3,63
B1	126	136	130	134	136	136	126	132,4	4,34
B2	124	118	118	116	122	124	116	119,6	3,29
B3	126	132	132	122	122	132	122	126,8	5,02
B4	138	132	140	138	142	142	132	138	3,74
B5	140	142	136	144	136	144	136	139,6	3,58
C1	188	188	182	190	184	190	182	186,4	3,29
C2	194	192	202	202	196	202	192	197,2	4,60
C3	182	182	188	184	186	188	182	184,4	2,61
C4	194	190	190	200	196	200	190	194	4,24
C5	208	206	212	212	212	212	206	210	2,83

Tablica 5.3. Rezultati mjerenja magnetskom metodom drugog mjeritelja

M2	1.	2.	3.	4.	5.	max.	min.	\bar{x}	s
A1	62	60	60	62	66	66	60	62	2,45
A2	70	70	62	66	64	70	62	66,4	3,58
A3	82	80	80	76	76	82	76	78,8	2,68
A4	64	68	68	66	64	68	64	66	2,00
A5	50	52	47	56	50	56	47	51	3,32
B1	132	136	138	136	138	138	132	136	2,45
B2	120	124	116	116	120	124	116	119,2	3,35
B3	134	140	140	138	142	142	134	138,8	3,03
B4	158	162	154	152	152	162	152	155,6	4,34
B5	144	144	136	136	144	144	136	140,8	4,38
C1	186	180	186	180	184	186	180	183,2	3,03
C2	202	204	204	202	202	204	202	202,8	1,01
C3	186	188	188	184	182	188	182	185,6	2,61
C4	184	188	192	192	190	192	184	189,2	3,35
C5	210	210	210	202	208	210	202	208	3,46

Tablica 5.4. Rezultati mjerenja magnetskom metodom trećeg mjeritelja

M3	1.	2.	3.	4.	5.	max.	min.	\bar{x}	s
A1	58	58	68	64	60	68	58	61,6	4,34
A2	64	64	66	56	62	66	56	62,4	3,85
A3	74	80	74	72	78	80	72	75,6	3,29
A4	68	60	62	70	64	70	60	64,8	4,15
A5	50	54	56	58	58	58	50	55,2	3,35
B1	132	138	138	134	134	138	132	135,2	2,68
B2	134	126	126	126	128	134	126	128	3,46
B3	126	134	122	128	122	134	122	126,4	4,98
B4	148	148	142	152	146	152	142	147,2	3,63
B5	138	138	144	136	140	144	136	139,2	3,03
C1	184	186	178	182	186	186	178	183,2	3,35
C2	198	206	202	202	204	206	198	202,4	2,97
C3	184	186	186	180	178	186	178	182,8	3,63
C4	190	188	188	192	188	192	188	189,2	1,79
C5	204	200	204	206	206	206	200	204	2,45

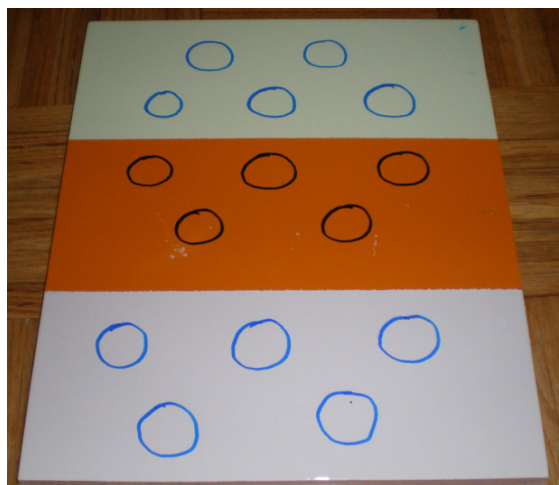
6. MJERENJE DEBLJINE PREVLAKE METODOM VRTLOŽNIH STRUJA

6.1. Plan mjerenja

Mjerenje debljine prevlaka metodom vrtložnih struja (EC) provedena su na aluminijskoj ploči dimenzija 300 x 300 x 10 (mm). Ploča je podijeljena na tri dijela, kao kod mjerenja magnetskom metodom, na kojima su nanoseni premazi različitih debljina:

- dio A – temeljni premaz očekivane debljine 50 μm
- dio B – temeljni sloj s međuslojem očekivane ukupne debljine od 100 μm
- dio C – temeljni sloj s međuslojem i pokrivnim sloj očekivane ukupne debljine od 150 μm

Na svakom dijelu aluminijske ploče odabrano je pet proizvoljnih točaka mjerenja. Točke mjerenja označene su ručno, voodootpornim markerom plave boje (slika 6.1), i obilježavaju nešto veću površinu od kontaktne površine mjerne sonde. Stoga je teoretski moguće da eventualna neravnomjernost debljine prevlake doprinese rasipanju rezultata mjerenja u slučaju ako mjeritelj kod ponavljanja mjerenja neznatno promijeni poziciju sonde unutar označene mjerne točke.



Slika 6.1. Aluminijska ploča s označenim mjestima mjerenja

Mjerenja su provedena na isti način i istim redoslijedom kao kod mjerenja magnetskom metodom. Rezultati mjerenja dobiveni od strane jednog mjeritelja pohranjuju se u uređaju tijekom mjerenja, a ispis rezultata mjerenja jednog mjeritelja dobije se spajanjem uređaja na računalo i korištenjem programa Posisoft, kao kod mjerenja magnetskom metodom. Mjerenja su provela ukupno tri mjeritelja.

6.2. Kalibracija instrumenta

Za mjerenje debljine prevlake na aluminijskoj ploči korišten je isti uređaj, “DeFelsko FSN3”, kao i kod mjerenja debljine prevlake na čeličnoj ploči. Uređaj prema vrsti podloge sam prepoznaje metodu kojom je potrebno mjeriti debljinu prevlake. Frekvencija uređaja prilikom mjerenja vrtložnim strujama je 5 MHz, što znači da standardna dubina penetracije vrtložnih struja u aluminij, prema jednadžbi 4.1, iznosi 4,24 mm.

Uređaj se kalibrira jednako kao kod mjerenja magnetskom metodom, putem tzv. “nulte kalibracije” i pomoću etalonskih listića, prikazanih na slici 5.4. Tablica 6.1 prikazuje korištene debljine etalonskih listića pri kalibraciji instrumenta za mjerenje ciljanih vrijednosti debljina prevlaka.

Tablica 6.1. Korištene debljine etalonskih listića za aluminijsku ploču

Debljina etalonskog listića	Ciljana vrijednost debljine prevlake
54 μm	50 μm
128 μm	100 μm
128 μm	150 μm

6.3. Rezultati mjerenja

Mjerenja su provela tri mjeritelja, M1, M2 i M3, a rezultati mjerenja prikazani su u tablicama 6.1, 6.2 i 6.3.

Tablica 6.2. Rezultati mjerenja prvog mjeritelja metodom vrtložnih struja

M1	1.	2.	3.	4.	5.	max.	min.	\bar{x}	s
A1	43	43	38	39	38	43	38	40,2	2,6
A2	42	43	43	44	44	44	42	43,2	0,8
A3	39	39	39	39	39	39	39	39	0
A4	42	42	42	42	42	42	42	42	0
A5	43	42	43	41	42	43	41	42,2	0,8
B1	92	92	94	92	92	94	92	92,4	0,9
B2	88	88	88	90	88	90	88	88,4	0,9
B3	92	90	92	92	92	92	90	91,6	0,9
B4	92	94	94	94	92	94	92	93,2	1,0
B5	90	90	90	90	90	90	90	90	0
C1	172	172	174	174	172	174	172	172,8	1,1
C2	156	154	156	156	158	158	154	156	1,4
C3	152	152	150	150	152	152	150	151,2	1,1
C4	146	146	146	148	148	148	146	146,8	1,1
C5	142	140	138	138	140	142	138	139,6	1,7

Tablica 6.3. Rezultati mjerenja drugog mjeritelja metodom vrtložnih struja

M2	1.	2.	3.	4.	5.	max.	min.	\bar{x}	s
A1	40	40	40	40	40	40	40	40	0
A2	40	40	40	41	41	41	40	40,4	0,6
A3	37	38	37	38	37	38	37	37,4	0,6
A4	37	38	41	40	40	41	37	39,2	1,6
A5	41	41	41	41	41	41	41	41	0
B1	90	92	90	90	90	92	90	90,4	0,9
B2	88	86	88	86	88	88	86	87,2	1,1
B3	90	94	90	90	90	94	90	90,8	1,8
B4	92	98	92	92	92	98	92	93,2	2,7
B5	88	90	90	90	88	90	88	89,2	1,1
C1	172	174	172	172	172	174	172	172,4	0,9
C2	156	156	156	158	156	158	156	156,4	0,9
C3	150	150	152	150	152	152	150	150,8	1,1
C4	146	146	146	146	148	148	146	146,4	0,9
C5	140	142	140	140	140	142	140	140,4	0,9

Tablica 6.4. Rezultati mjerenja trećeg mjeritelja metodom vrtložnih struja

M3	1.	2.	3.	4.	5.	max.	min.	\bar{x}	s
A1	43	43	43	43	43	43	43	43	0
A2	43	44	44	44	44	44	43	43,8	0,5
A3	40	40	40	40	39	40	39	39,8	0,5
A4	43	43	43	42	43	43	42	42,8	0,5
A5	44	44	44	44	44	44	44	44	0
B1	88	88	88	88	88	88	88	88	0
B2	84	84	84	84	86	86	84	84,4	0,9
B3	88	88	88	88	88	88	88	88	0
B4	90	90	90	88	90	90	88	89,6	0,9
B5	86	86	86	86	88	88	86	86,4	0,9
C1	168	170	170	172	168	170	168	169,6	1,7
C2	154	154	152	154	154	154	152	153,6	0,9
C3	150	152	152	152	152	152	150	151,6	0,9
C4	142	140	142	142	142	142	140	141,6	0,9
C5	136	136	138	140	136	140	136	137,2	1,8

7. ANALIZA I USPOREDBA REZULTATA MJERENJA

Za analizu rezultata mjerenja korišten je program Statgraphics plus 5.1.

Provedene su tri analize:

1. analiza ponovljivosti i obnovljivosti (R&R) na svim dijelovima čelične ploče za magnetsku metodu (MT),
2. analiza ponovljivosti i obnovljivosti (R&R) na svim dijelovima aluminijske ploče za metodu vrtložnih struja (EC),
3. usporedba metoda s obzirom na ponovljivost i obnovljivost razlika rezultata mjerenja.

Za treću predviđenu analizu bilo je potrebno procijeniti stvarno postignutu debljinu prevlake, odnosno referentnu debljinu za sva tri dijela dviju ploča. Sa svih dijelova ploča izrezan je po jedan uzorak na kojemu je izmjerena debljina prevlake mikroskopom. Dobivene referentne vrijednosti debljina prevlaka prikazane su u tablici 7.1.

Tablica 7.1. Rezultati mjerenja dobiveni mikroskopom

	Čelična ploča			Aluminijska ploča		
μm	dio A	dio B	dio C	dio A	dio B	dio C
1.	65,13	126,57	188,92	34,90	84,71	168,92
2.	57,27	138,91	194,14	41,17	88,44	153,18
3.	71,88	152,12	202,17	43,23	90,13	141,93
\bar{x}	64,76	139,2	195,07	39,77	87,99	154,67
s	7,3	12,7	6,67	4,34	2,38	13,56

7.1. R&R analiza za magnetsku metodu

R&R analiza provedena je u programu Statgraphics, a podaci su organizirani za tri mjeritelja (operators), pet točaka mjerenja na pojedinim dijelovima ploča (parts) uz pet ponavljanja (trials). Analiza podataka prikazana je u tablici 7.2.

Tablica 7.2. Procijenjene standardne devijacije za magnetsku metodu

	μm	dio A	dio B	dio C
1.	s_r	3,45	3,77	2,97
2.	s_R	1,34	3,31	0,91
3.	$s_{R\&R}$	3,70	5,01	3,11
4.	s_{tm}	8,32	9,99	9,31
5.	$R_{\bar{x}}$	2,88	6,48	2,08
6.	$4 \cdot s_{R\&R}$	$\pm 7,41$	$\pm 10,03$	$\pm 6,21$
7.	T	$\pm 6,5$	$\pm 13,9$	$\pm 19,5$

gdje je:

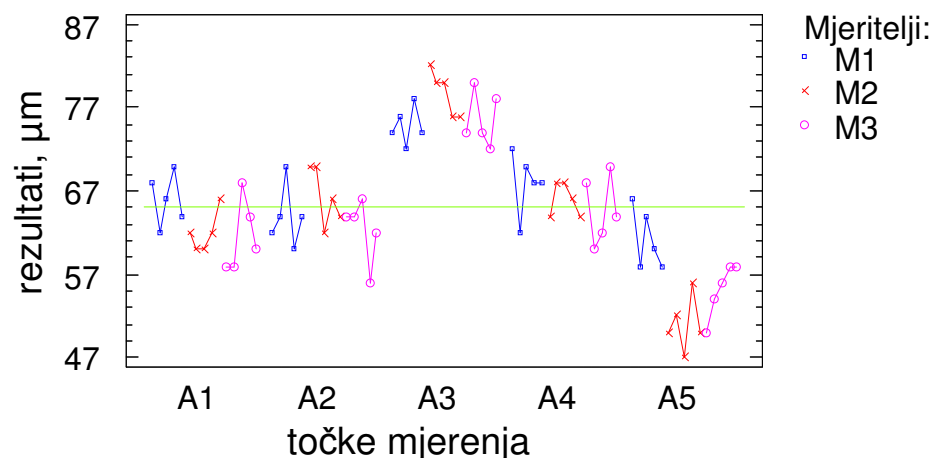
- s_r - procijenjena standardna devijacija ponovljivosti
- s_R - procijenjena standardna devijacija obnovljivosti
- $s_{R\&R}$ - kombinirana procijenjena standardna devijacija ponovljivosti i obnovljivosti
- s_{tm} - procijenjena standardna devijacija rezultata koja proizlazi iz različitosti debljina prevlaka u točkama mjerenja (parts)
- $R_{\bar{x}}$ - raspon aritmetičkih sredina rezultata mjerenja
- $4 \cdot s_{R\&R}$ - intervalna procjena preciznosti uz razinu povjerenja $P=95,45\%$ ($\pm 2 s_{R\&R}$)
- T - tolerancija zahtijevana normom [4]

Zahtjev norme [4] za točnost magnetske metode (tolerancija odstupanja, T) iznosi 10% stvarne (referentne) vrijednosti. Za potrebe ovog rada referentne vrijednosti debljina prevlaka utvrđene su mikroskopom i prikazane su u tablici 7.1. Uz razinu povjerenja od 95,45% odnosno interval koji iznosi četiri standardne devijacije ($\pm 2 \cdot s_{R\&R}$), procijenjena je preciznost mjerenja svakog dijela ploče i prikazana u tablici 7.2.

Proizlazi da je preciznost mjerenja na dijelu A čelične ploče izvan granica zahtijevane tolerancije i da primijenjena magnetska metoda mjerenja na debljini prevlake od 65 μm ne zadovoljava zahtjeve norme. Preciznost na dijelovima B i C, čelične ploče, unutar je granica tolerancije i metoda za takve debljine ispunjava zahtjev norme.

Čelična ploča – dio A

Na slici 7.1 prikazani su rezultati mjerenja za tri mjeritelja (M1, M2 i M3) u pet točaka mjerenja (A1, A2, A3, A4 i A5) na dijelu A čelične ploče.

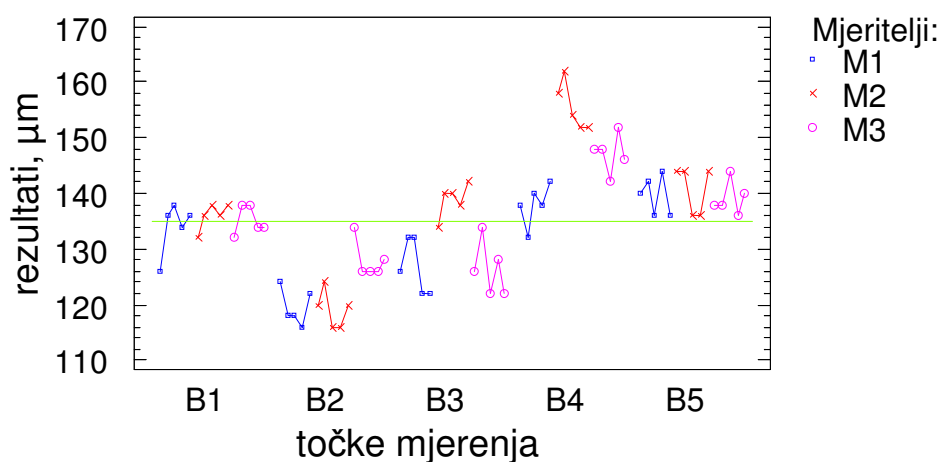


Slika 7.1. Grafički prikaz rezultata mjerenja na čeličnoj ploči – dio A

Može se uočiti da su u pojedinim točkama mjerenja rezultati relativno ujednačeni, kako u pogledu ponovljivosti tako i u pogledu obnovljivosti. U točki mjerenja A5 ponovljena mjerenja mjeritelja M1 značajnije se razlikuju od rezultata druge dvojice mjeritelja. Promatrajući sveukupne rezultate mjerenja u pojedinim točkama na slici 7.1 uočljivo je da rezultati u točkama A3 i A5 u većoj mjeri odstupaju od rezultata u ostale tri točke mjerenja. Temeljem toga može se pretpostaviti da se u tim točkama (A3 i A5) debljine prevlake značajnije razlikuju od vrijednosti debljine prevlake u ostalim točkama (A1, A2 i A4).

Čelična ploča – dio B

Na slici 7.2 prikazani su rezultati mjerenja za tri mjeritelja (M1, M2 i M3) u pet točaka mjerenja (B1, B2, B3, B4 i B5) na dijelu B čelične ploče.

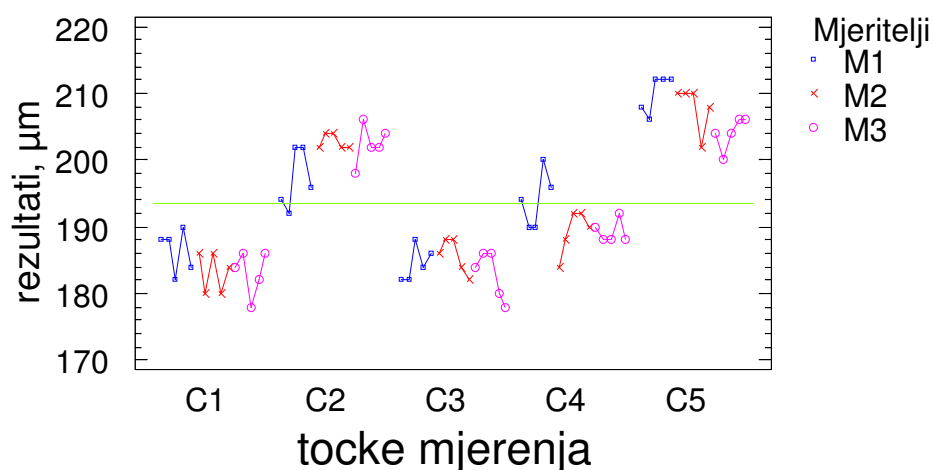


Slika 7.2. Grafički prikaz rezultata mjerenja na čeličnoj ploči – dio B

Na dijelu ploče B, za razliku od rezultata na dijelu ploče A, izraženije su razlike između mjeritelja u točkama mjerenja B2, B3 i B4. Ponovljivost rezultata pojedinih mjeritelja je neznatno veća ($s_r=3,77 \mu\text{m}$) od rezultata na drugim dijelovima ploče. Obnovljivost rezultata na dijelu ploče B ($s_R=3,31 \mu\text{m}$) je značajno veća od obnovljivosti na dijelovima A i C, čelične ploče, što proizlazi i iz podataka prikazanih u tablici 7.2. Standardna devijacija obnovljivosti (s_R) je 2,5 puta veća od iste standardne devijacije na dijelu A i 3,5 puta veća od iste standardne devijacije na dijelu C. Raspon aritmetičkih sredina rezultata mjerenja na ovom dijelu ploče ($R_{\bar{x}}=6,48 \mu\text{m}$) značajno je veći od istog raspona na preostalim dijelovima ploče. Procijenjena standardna devijacija koja proizlazi iz različitosti debljina prevlaka u točkama mjerenja ($s_{tm}=9,99 \mu\text{m}$) neznatno je veća od iste standardne devijacije na dijelovima ploče A i C, što se također vidi iz tablice 7.2.

Čelična ploča – dio C

Na slici 7.3 prikazani su rezultati mjerenja za tri mjeritelja (M1, M2 i M3) u pet točaka mjerenja (C1, C2, C3, C4 i C5) na dijelu C čelične ploče.



Slika 7.3. Grafički prikaz rezultata mjerenja na čeličnoj ploči – dio C

Može se uočiti da su u svim točkama mjerenja, zasebno promatrano, rezultati između mjeritelja ujednačeni u pogledu obnovljivosti, a u usporedbi s dijelovima A i B, na ovom su dijelu ploče mjeritelji ostvarili najbolju obnovljivost ($s_R=0,91 \mu\text{m}$). Ponovljivost rezultata za sve točke mjerenja na dijelu C ($s_r=2,97 \mu\text{m}$) približno je jednaka ponovljivosti rezultata na dijelovima ploče A i B. U odnosu na vrijednosti standardnih devijacija ponovljivosti i obnovljivosti uzrok najveće varijabilnosti rezultata mjerenja na dijelu C čelične ploče, kao i na dijelovima A i B iste ploče, proizlazi iz različitosti debljine premaza u točkama mjerenja ($s_{tm}=9,31 \mu\text{m}$), što navodi na zaključak da cijela ploča nije ravnomjerno premazana i da pomoću primijenjene magnetske metode možemo utvrditi te različitosti.

7.2. R&R analiza za metodu vrtložnih struja

R&R analiza provedena je u programu Statgraphics, a podaci su organizirani za tri mjeritelja (operators), pet točaka mjerenja na pojedinim dijelovima ploča (parts) uz pet ponavljanja (trials). Analiza podataka prikazana je u tablici 7.3.

Tablica 7.3. Procijenjene standardne devijacije za metodu vrtložnih struja

	μm	dio A	dio B	dio C
1.	s_r	0,51	0,86	1,08
2.	s_R	1,62	2,0	1,32
3.	$s_{R\&R}$	1,69	2,18	1,71
4.	s_{tm}	1,52	2,15	13,13
5.	$R_{\bar{x}}$	3,08	3,84	2,56
6.	$4 \cdot s_{R\&R}$	$\pm 3,38$	$\pm 4,36$	$\pm 3,42$
7.	T	$\pm 4,0$	$\pm 8,8$	$\pm 15,5$

gdje je:

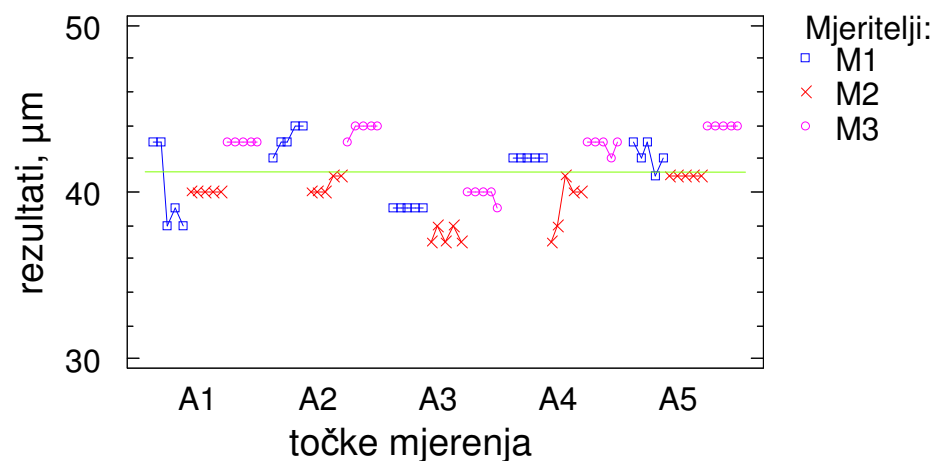
- s_r - procijenjena standardna devijacija ponovljivosti
- s_R - procijenjena standardna devijacija obnovljivosti
- $s_{R\&R}$ - kombinirana procijenjena standardna devijacija ponovljivosti i obnovljivosti
- s_{tm} - procijenjena standardna devijacija rezultata koja proizlazi iz različitosti debljina prevlaka u točkama mjerenja (parts)
- $R_{\bar{x}}$ - raspon aritmetičkih sredina rezultata mjerenja
- $4 \cdot s_{R\&R}$ - intervalna procjena preciznosti uz razinu povjerenja $P=95,45\%$ ($\pm 2 s_{R\&R}$)
- T - tolerancija zahtijevana normom [6]

Zahtjev norme [6] za točnost metode vrtložnih struja (tolerancija odstupanja, T) iznosi 10% stvarne (referentne) vrijednosti. Za potrebe ovog rada referentne vrijednosti debljina prevlaka utvrđene su mikroskopom i prikazane su u tablici 7.1. Uz razinu povjerenja od 95,45% odnosno interval koji iznosi četiri standardne devijacije ($\pm 2 \cdot s_{R\&R}$), procijenjena je preciznost mjerenja svakog dijela ploče i prikazana u tablici 7.3.

Proizlazi da je preciznost na svim dijelovima aluminijske ploče unutar granica tolerancije (T) iz čega se može zaključiti da metoda ispunjava zahtjev norme.

Aluminijska ploča – dio A

Na slici 7.4 prikazani su rezultati mjerenja za tri mjeritelja (M1, M2 i M3) u pet točaka mjerenja (A1, A2, A3, A4 i A5) na dijelu A aluminijske ploče.

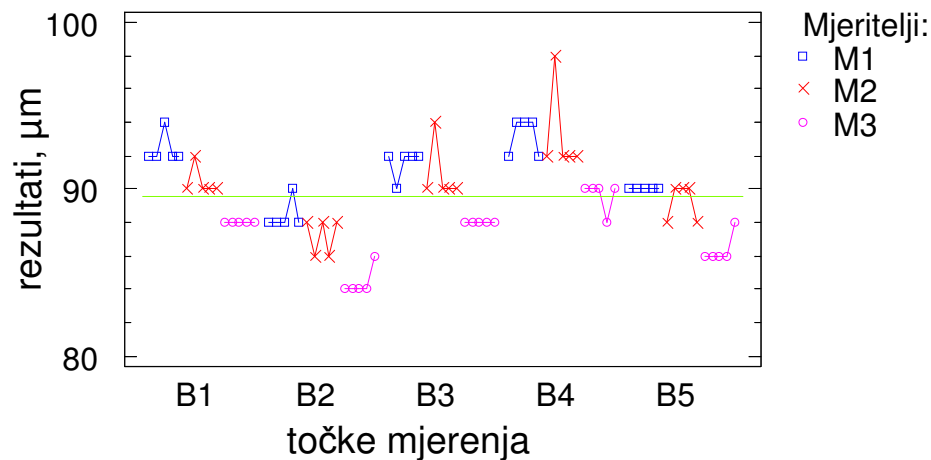


Slika 7.4. Grafički prikaz rezultata mjerenja na aluminijskoj ploči – dio A

Može se uočiti da su u svim točkama mjerenja rezultati relativno ujednačeni, posebice u pogledu ponovljivosti ($s_r=0,51 \text{ } \mu\text{m}$) uz nešto veći iznos standardne devijacije obnovljivosti ($s_R=1,62 \text{ } \mu\text{m}$) koji je međutim istog reda veličine kao i kod magnetske metode. Na ovom dijelu aluminijske ploče rezultati se značajno ne rasipaju niti zbog različitosti debljina premaza u pojedinim točkama mjerenja, što se vidi iz vrijednosti standardne devijacije točaka mjerenja ($s_{tm}=1,52 \text{ } \mu\text{m}$) koja je značajno manja od istih standardnih devijacija za sva tri dijela čelične ploče.

Aluminijska ploča – dio B

Na slici 7.5 prikazani su rezultati mjerenja za tri mjeritelja (M1, M2 i M3) u pet točaka mjerenja (B1, B2, B3, B4 i B5) na dijelu B aluminijske ploče.

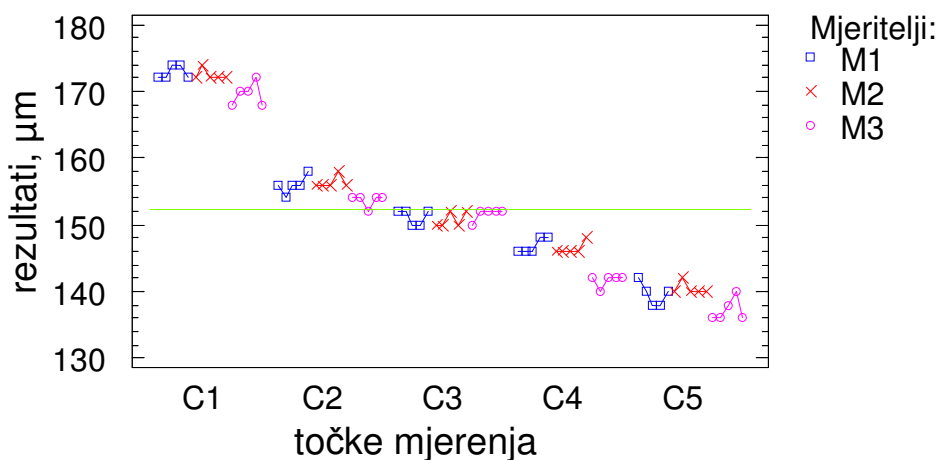


Slika 7.5. Grafički prikaz rezultata mjerenja na aluminijskoj ploči – dio B

Iz slike se vidi da se rezultati mjerenja trećeg mjeritelja (M3) neznatno razlikuju od preostala dva mjeritelja u pojedinim točkama mjerenja, a po iznosu su redovito manjih izmjerenih vrijednosti. To izravno utječe na obnovljivost rezultata ($s_R=2,0 \mu\text{m}$) koja je nešto veća od obnovljivosti rezultata na dijelovima A i C aluminijske ploče. Standardna devijacija ponovljivosti ($s_r=0,86 \mu\text{m}$) i standardna devijacija točaka mjerenja ($s_{tm}=2,15 \mu\text{m}$) nešto su većih iznosa od istih standardnih devijacija na dijelu A, što se vidi iz tablice 7.3. Raspon aritmetičkih sredina rezultata mjerenja ($R_{\bar{x}}=3,84 \mu\text{m}$) na ovom dijelu ploče neznatno je veći od istog raspona na dijelovima A i C aluminijske ploče.

Aluminijska ploča – dio C

Na slici 7.6 prikazani su rezultati mjerenja za tri mjeritelja (M1, M2 i M3) u pet točaka mjerenja (C1, C2, C3, C4 i C5) na dijelu C aluminijske ploče.



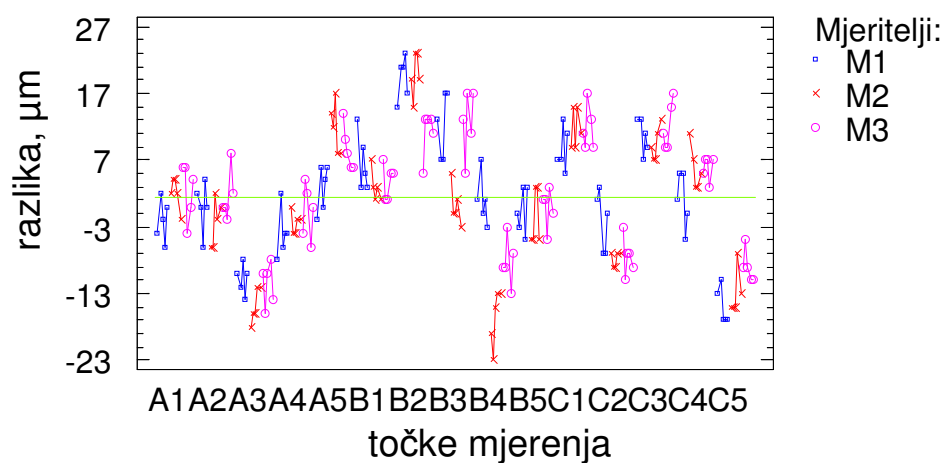
Slika 7.6. Grafički prikaz rezultata mjerenja na aluminijskoj ploči – dio C

Može se uočiti da su u svim mjernim točkama rezultati ujednačeni kako u pogledu ponovljivosti tako i u pogledu obnovljivosti, osim u točki C4, gdje se niz mjerenja mjeritelja M3 ponovo u neznatno većoj mjeri razlikuje od rezultata druge dvojice mjeritelja. Standardna devijacija ponovljivosti ($s_r=1,08 \mu\text{m}$) neznatno je veća od iste standardne devijacije na dijelovima A i B ove ploče, dok je standardna devijacija obnovljivosti ($s_R=1,32 \mu\text{m}$) najmanja upravo na ovom dijelu aluminijske ploče, što se može iščitati iz tablice 7.3. Raspon aritmetičkih sredina rezultata mjerenja ($R_{\bar{x}}=2,56 \mu\text{m}$) na ovom dijelu ploče neznatno je manji od istog raspona na preostalim dijelovima ploče. Na slici 7.6 također je vidljivo da se nizovi mjernih rezultata značajnije razlikuju između pojedinih točaka mjerenja, posebno u točkama C1 i C5, što proizlazi i iz standardne devijacije točaka mjerenja ($s_{tm}=13,13 \mu\text{m}$) na dijelu C, koja je 6 puta veća od iste standardne devijacije na dijelu B i 8 puta veća od iste standardne devijacije na dijelu A aluminijske ploče. Na temelju toga može se pretpostaviti da se u pojedinim točkama

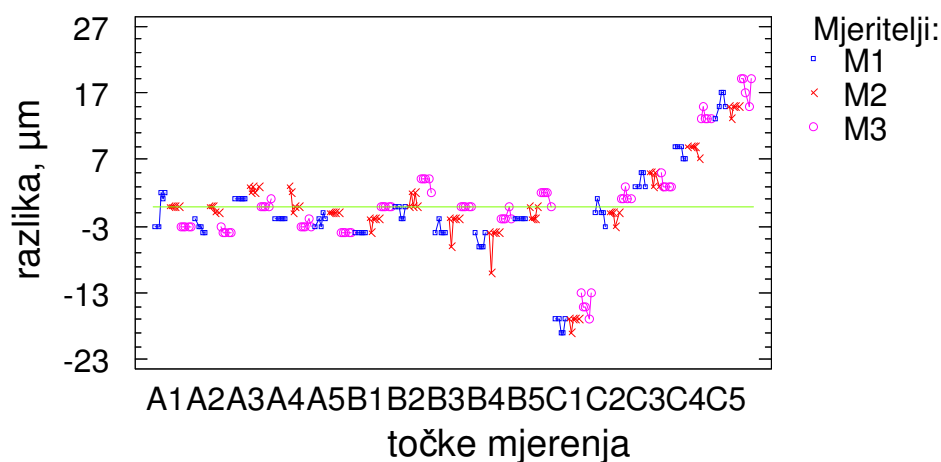
mjerjenja (posebno u točkama C1 i C5), na dijelu C aluminijske ploče, debljine prevlake razlikuju od vrijednosti debljine prevlake u ostalim točkama (C2, C3 i C4).

7.3. Usporedba rezultata mjerenja

Za potrebe R&R analize i usporedbe dviju mjernih metoda, magnetske metode (MT) i metode vrtložnih struja (EC), izračunate su razlike za svaki pojedini rezultat mjerenja u odnosu na referentne vrijednosti debljine prevlake izmjerene pomoću mikroskopa za svaki odgovarajući dio ploča. Na taj način dobivena su odstupanja rezultata mjerenja magnetske metode i metode vrtložnih struja u odnosu na referentna mjerenja provedena mikroskopom. Slika 7.7 prikazuje tako procijenjene razlike za mjerenja magnetskom metodom, dok slika 7.8 prikazuje procijenjene razlike za mjerenja metodom vrtložnih struja.



Slika 7.7. Procijenjene razlike za mjerenja magnetskom metodom



Slika 7.8. Procijenjene razlike za mjerenja metodom vrtložnih struja

Iz slika 7.7 i 7.8 može se zaključiti da su rezultati metode vrtložnih struja točniji i precizniji od rezultata dobivenih magnetskom metodom. Procijenjene razlike rezultata, dobivenih metodom vrtložnih struja, manje se rasipaju u odnosu na magnetsku metodu, što se vidi iz standardnih devijacija ponovljivosti (s_r) prikazanih u tablici 7.4.

Obzirom na uočljiviju izdvojenost mjernih nizova u točkama C1 i C5 te djelomično u točki C4, u odnosu na referentnu vrijednost (slika 7.8) potvrđuje se zaključak iznesen u poglavlju 7.2, a koji je iznesen na temelju analize rezultata za dio C aluminijske ploče: debljine prevlaka u točkama C1 i C5 razlikuju se od vrijednosti debljine prevlake u ostalim točkama.

Tablica 7.4. Procijenjene standardne devijacije razlika rezultata mjerenja

	μm	MT	EC
1.	s_r	3,39	0,80
2.	s_R	0,89	0,88
3.	$s_{R\&R}$	3,50	1,19
4.	s_{tm}	8,20	9,16

Standardna devijacija ponovljivosti procijenjenih razlika (s_r) 4 je puta veća za magnetsku metodu, u odnosu na metodu vrtložnih struja, dok su standardne devijacije obnovljivosti približno jednake.

Rasipanja promatranih razlika koja proizlaze iz različitosti debljina prevlaka u pojedinim točkama mjerenja (s_{tm}) znatno je veća od standardne devijacije ponovljivosti i obnovljivosti ($s_{R\&R}$) kod obje metode.

8. ZAKLJUČAK

Cilj ovog rada je usporedba dviju nerazornih metoda mjerenja debljina prevlaka, magnetske metode i metode vrtložnih struja.

Temeljem prikaza utjecajnih čimbenika i principa metoda planirana su i provedena usporedbena mjerenja na pripremljenim uzorcima. Mjerenja metodom vrtložnih struja provedena su na aluminijskoj ploči, dok su mjerenja magnetskom metodom provedena na čeličnoj ploči. U svrhu usporedne analize obiju metoda, procijenjene su referentne vrijednosti debljine prevlaka pojedinih uzoraka na osnovu mjerenja poprečnih presjeka uzoraka pomoću mikroskopa.

Rezultati provedenih analiza, dobiveni pomoću programskog paketa Statgraphics plus 5.1, komentirani su obzirom na ponovljivost i obnovljivost, te obzirom na zahtijevanu preciznost mjernih metoda u relevantnim normama [4, 6].

Procijenjena preciznost rezultata dobivenih metodom vrtložnih struja pokazala se boljom i to prvenstveno zbog približno četiri puta manjeg iznosa ponovljivosti mjerenja ($s_r=0,80 \mu\text{m}$) u odnosu na magnetsku metodu ($s_r=3,39 \mu\text{m}$), a kako je prikazano u tablici 7.4.

Dodatno je potrebno istaknuti da je za magnetsku metodu ponovljivost rezultata mjerenja ($s_r=3,39 \mu\text{m}$) približno četiri puta veća od obnovljivosti rezultata mjerenja tom metodom ($s_R=0,89 \mu\text{m}$) što je neuobičajeno.

Procijenjena preciznost rezultata mjerenja magnetskom metodom na dijelu A čelične ploče (tablica 7.2) veća je od dopuštene tolerancije iz čega proizlazi da primjena ove metode na debljinama prevlaka reda veličine $65 \mu\text{m}$ nije u skladu sa zahtjevima norme [4].

U sveobuhvatnim rezultatima mjerenja, doprinos rasipanja uslijed različitosti debljina prevlaka u pojedinim točkama mjerenja pripremljenih dijelova ploča, a radi nesavršenosti tehnologije nanošenja prevlaka, nije značajno različit na pločama koje su korištene za mjerenja magnetskom metodom ($s_{tm}=8,20 \mu\text{m}$) i metodom vrtložnih struja ($s_{tm}=9,16 \mu\text{m}$).

9. LITERATURA

1. Kliškić, M., Vrsalović, L.: *Tehnologija površinske zaštite*, Kemijsko - tehnološki fakultet u Splitu, Split, 2005
2. www.pfonline.com/articles/0206gf1.html
3. www.defelsko.com/technotes/coating_thickness_measurement.htm
4. HRN EN ISO 2178: 1999. – Nemagnetske prevlake na magnetskim podlogama – Mjerenje debljine prevlake – Magnetska metoda
5. D. Novosel: Diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2005.
6. HRN EN ISO 2360: 2003. – Nevodljive prevlake na nemagnetskim električnim vodljivim metalnim podlogama – Mjerenje debljine prevlake – Metoda vrtložnih struja